



Hinc patriam sustinet

Instituto Superior de Agronomia
Universidade Técnica de Lisboa

O RISCO DE INUNDAÇÃO URBANA NAS FRENTES DE ÁGUA DE DELTAS E ESTUÁRIOS EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

A FRENTE RIBEIRINHA DE LISBOA

Diamantino Figueiredo Rodrigues de Oliveira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Arquitectura Paisagista

Orientador: Luís Paulo Almeida Faria Ribeiro

Co-orientador: Leonel de Sousa Fadigas

Júri:

Presidente: Doutor Francisco Manuel Cardoso de Castro Rego, Professor Associado com agregação do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.

Vogais: Doutor Leonel de Sousa Fadigas, Professor Associado com agregação da Faculdade de Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa, coorientador;

Doutor Luís Paulo Almeida Faria Ribeiro, Professor Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa, orientador;

Doutor Pedro Miguel Ramos Arsénio, Professor Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Licenciado Miguel António Navas Cândido, Assistente do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa, na qualidade de especialista.

Lisboa, 2013

AGRADECIMENTOS

Após diversos anos em que me dediquei exclusivamente à prática profissional de Arquitectura Paisagista, embora sempre com um interesse na evolução das questões da paisagem, gostaria, em primeiro lugar, de agradecer ao Professor João Pedro Costa pela oportunidade de poder voltar a ligar-me ao mundo académico, nomeadamente na investigação de um tema tão actual como o dos deltas e estuários urbanizados. Sem esta possibilidade, o trabalho aqui apresentado não teria sido possível. Um especial agradecimento ao Professor Leonel Fadigas, pela confiança, interesse e orientação na abordagem seguida, e ao Professor Luís Paulo Ribeiro pela disponibilidade e abertura que sempre o caracterizaram.

SUMÁRIO

As alterações climáticas constituem uma das principais ameaças das cidades de deltas e estuários. A subida do nível médio do mar, o aumento da intensidade e frequência das precipitações extremas das tempestades aumentam exponencialmente o risco de inundação destes territórios, colocando em causa a sua manutenção e desenvolvimento no futuro. O presente trabalho foca-se na particularidade das frentes de água e na forma como os futuros processos aumentam o seu risco de inundação urbana. A relevância do problema é reforçada pela presente percepção da incapacidade dos sistemas de drenagem na adaptação ao problema, obrigando as cidades de deltas e estuários a repensar a forma como realizam o escoamento das suas águas pluviais. Nesta óptica, enquadra-se o potencial das principais estratégias e medidas de adaptação urbana existentes, nomeadamente ao nível do planeamento, do desenho urbano e da integração dos processos naturais.

De forma a contextualizar o problema, analisam-se os possíveis impactos das alterações climáticas no risco de inundação urbana da frente ribeirinha de Lisboa e a sua relação com o actual sistema de drenagem, demonstrando a necessidade de integração do problema no futuro planeamento urbano.

Palavras-chave: Alterações Climáticas, Risco de Inundação, Sistema de Drenagem, Águas Pluviais, Adaptação Urbana, Processos Naturais.

SUMMARY

The present climate changes constitute one of the main threats to delta and estuary cities. The rise of the mean sea level and the increase of the intensity and frequency of the precipitation extremes are presently raising the flood risk of these territories, jeopardizing their maintenance and future development. The present work focuses on how these climate change processes can raise the risk of the urban drainage flooding events at the cities waterfronts. The relevance of the problem is reinforced by the present incapacity of the urban drainage systems to follow the needed adaptation, forcing the delta and estuary cities to rethink the management of their storm water outflow. Under this view, the main drainage adaptation strategies and measures are analysed, namely in urban planning and design, and on the benefits of the integration of natural processes.

To contextualize the addressed problem, the possible drainage flood impacts over the Lisbon riverfront are analysed. The influence of the climate change processes over the current drainage system and the flood risk of this area are shown, demonstrating the need for integration of the drainage problem in the future urban planning.

Key words: Climate Change, Urban Drainage Flooding, Drainage Systems, Storm water, Urban Adaptation, Natural Processes.

EXTENDED SUMMARY

The present climate changes constitute one of the main threats to delta and estuary cities. The rise of the mean sea level and the increase of the intensity and frequency of the precipitation extremes are presently raising the flood risk of these territories, jeopardizing their maintenance and future development. The present work focuses on how these climate change processes can raise the risk of the urban drainage flooding events at the cities waterfronts. From the different risks posed by climate change on the urban deltas waterfronts, the drainage flooding can constitute one of the main threats due to the observed rise on the precipitation intensity and the projected sea level rise, hampering the outflow of the pluvial waters of these already sensitive areas. The relevance of the problem is reinforced by the present incapacity of the urban drainage systems to follow the needed adaptation, forcing the delta and estuary cities to rethink the management of their storm water outflow and establish new hydrological relations with the urban field.

The present work pretends to frame the main processes involved and their territorial impacts on the deltas waterfronts, to evidence the critical relation between the drainage flood risk and the storm water management on the context of climate change. Its comprehension is essential to the establishment of adaptation strategies and measures on the urban level to avoid civil protection responses as well as a progressive abandonment of critical urban areas or the expansion of the flood impacts to the inner city. Under this view, the main drainage adaptation strategies and measures are analysed, namely in urban planning and design, and on the benefits of the integration of natural processes.

To contextualize the addressed problem, the possible drainage flood impacts over the Lisbon riverfront are analysed, by showing the influence of the climate change processes over the current drainage system and the flood risk of this area. Without wanting to show possible answers, it's illustrated the urgent need to tackle the future storm water problems, which poses an important threat over significant areas and a high number of population and activities.

Key words: Climate Change, Urban Drainage Flooding, Drainage Systems, Storm water, Urban Adaptation, Natural Processes.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
SUMÁRIO	ii
SUMMARY	iii
EXTENDED SUMMARY	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABELAS	xi
LISTA DE ACRÓNIMOS	xii
GLOSSÁRIO DE TERMOS	xiii
INTRODUÇÃO	1
Justificação do tema	1
Metodologia	5
CAPÍTULO I	7
Alterações climáticas e o risco de inundação urbana em deltas e estuários	7
1.1. Principais causas, projecções e impactos das alterações climáticas	8
1.2. Alterações na precipitação e tempestades	14
1.3. A subida do nível médio do mar	20
CAPÍTULO II	27
O risco de inundação nas frentes de água de deltas e estuários urbanizados no contexto de alterações climáticas. Estratégias e medidas de adaptação	27
2.1. O risco de inundação nas frentes de água de deltas e estuários em cenários de alterações climáticas	28
2.2. Estratégias de adaptação ao risco de inundação urbana em frentes de água de deltas e estuários	31
2.3. Medidas de adaptação ao risco de inundação urbana em frentes de água de deltas e estuários	39
2.3.1. Espaço para a água	40
2.3.2. Espaço para o escoamento	48

2.3.3. Resiliência	50
CAPÍTULO III	53
O risco de inundação urbana na frente ribeirinha de Lisboa em cenários de alterações climáticas	53
3.1. Caracterização do escoamento superficial da frente ribeirinha	54
3.2. Caracterização do sistema de drenagem artificial da frente ribeirinha	56
3.3. As inundações urbanas na frente ribeirinha	59
3.4. O risco de inundação urbana na frente ribeirinha em cenários de alterações climáticas	64
3.4.1. Os extremos de precipitação e as alterações climáticas	64
3.4.2. Nível do mar local e as alterações climáticas	65
3.4.3. A drenagem e o risco de inundação urbana na frente ribeirinha em cenários de alterações climáticas	66
CONCLUSÃO	70
BIBLIOGRAFIA	74
Anexos	84
Anexo 1	85
Anexo 2	86

ÍNDICE DE FIGURAS

- FIGURA 1. Evolução da temperatura média global em °C.
- FIGURA 2. Comparação da temperatura observada e simulada por modelos climáticos com forçamentos antropogénicos e naturais para o período de 1906-2005.
- FIGURA 3. Projecção do aquecimento médio da superfície para 2020-2029 e 2090-2099 para os cenários B1, A1B e A2.
- FIGURA 4. Alteração relativa na precipitação para o final do séc. XXI em relação a 1980-1999.
- FIGURA 5. Projecção do aquecimento global médio e da subida do nível do mar para o final do séc. XXI.
- FIGURA 6. Tendência da precipitação anual entre 1960 e 2012.
- FIGURA 7. Precipitação entre Dezembro e Março em Portugal e relação com o índice NAO.
- FIGURA 8. Alteração nos eventos de precipitação extrema entre 1900 e 2009.
- FIGURA 9. Projecções das alterações na precipitação anual e de Verão entre 1961–1990 e 2071–2100 para a Europa.
- FIGURA 10. Projecção das alterações na precipitação máxima diária no Inverno, relativamente a 1961–1990 a 2071–2100 e alteração relativa da perda do potencial médio anual das tempestades entre 1961-2000 e 2071-2100, para o cenário A1B.
- FIGURA 11. Variações de massa observadas nos mantos de gelo.
- FIGURA 12. Previsão da circulação oceânica de águas relativamente quentes no Mar de Weddell.
- FIGURA 13. Distribuição regional da subida do nível do mar medida por satélite entre Outubro de 1992 e Abril de 2012.
- FIGURA 14. Reconstrução da estrutura hidrográfica de Barcelona e da sua linha de costa, e

sistema sub-húmido em Lisboa.

- FIGURA 15. Esquema da relação entre a precipitação, a subida do nível da água e o escoamento costeiro, na origem de inundações urbanas nas frentes de água em cenários de alterações climáticas.
- FIGURA 16. Altura de água de uma inundação urbana em Copenhaga para um evento de precipitação extrema e estimativa de impactos monetários ao longo do tempo e em função das alterações do nível do mar e da precipitação para o risco de inundação costeira e urbana.
- FIGURA 17. Subida do nível do mar e o risco de inundação costeira e urbana.
- FIGURA 18. Custo das medidas de controlo de transbordos do sistema de drenagem pluvial para a cidade de Nova Iorque entre 2011 e 2031.
- FIGURA 19. Projecção do escoamento superficial para uma precipitação de 54 mm para a área urbana de Roterdão.
- FIGURA 20. Modelo de layers para planeamento da paisagem urbana.
- FIGURA 21. Plano do volume de água a acomodar por quarteirão na cidade de Roterdão.
- FIGURA 22. Exemplo de adaptação flexível à SNMM para o Estuário do Tamisa.
- FIGURA 23. Problemas de escoamento superficial em Singapura e estratégia descentralizada de retenção para minimização dos picos de precipitação.
- FIGURA 24. Corte esquemático da influência da retenção do escoamento na drenagem das frentes de água.
- FIGURA 25. Localização dos depósitos de águas pluviais de Barcelona.
- FIGURA 26. Depósito na Plaza Doctors Dolsa e no Parque Joan Miró.
- FIGURA 27. Conceito de praça de água.
- FIGURA 28. Canal/bacia de retenção em Roterdão.
- FIGURA 29. Proposta para a abertura do canal da Ribeira da Lage e criação de uma bacia de retenção/parque na Quinta do Marquês, Oeiras.
- FIGURA 30. Bacia de retenção ocupada por campo de ténis nos períodos secos.

- FIGURA 31. Diferentes tipologias de bacias de retenção.
- FIGURA 32. Pormenor de construção de cobertura verde e azul e esquema de captação de água na cobertura dos edifícios para uso em peça de água no espaço público.
- FIGURA 33. Pormenores de construção de trincheiras verdes e de calhau rolado, e de poço de infiltração.
- FIGURA 34. Problemas de escoamento superficial em Singapura e estratégia descentralizada de retenção para minimização dos picos de precipitação.
- FIGURA 35. Exemplo de um sistema de drenagem urbana sustentável.
- FIGURA 36. Alçado frontal de esquema de frente de água com escoamento canalizado a céu aberto e no subsolo.
- FIGURA 37. Canal original, actualmente como auto-estrada e projecto de reconversão.
- FIGURA 38. Parque de Besòs, Barcelona, com caudal regular e em períodos de cheia.
- FIGURA 39. Parque urbano da Agualva-Cacém.
- FIGURA 40. Barreira de sobrelevação do estuário do Tamisa e do delta do Reno e do Meuse.
- FIGURA 41. Resposta resiliente às inundações urbanas.
- FIGURA 42. Operação de regeneração urbana da “HafenCity” em Hamburgo, aceitando a inundação periódica e antecipando os cenários futuros e medidas de resiliência ao nível do edifício.
- FIGURA 43. Hipsometria e sistema húmido e subsistema de transição fluvial-estuarino no concelho de Lisboa.
- FIGURA 44. Evolução histórica dos aterros na frente ribeirinha de Lisboa.
- FIGURA 45. Ribeira de Alcântara antes da canalização em 1910, durante a canalização (1945) e como Av. de Ceuta (1949).
- FIGURA 46. Bacias hidrográficas naturais e bacias de drenagem do sistema artificial.
- FIGURA 47. Rede de circulação e de drenagem na frente ribeirinha da sub-bacia de Alcântara.
- FIGURA 48. Sistema de drenagem na frente ribeirinha de Lisboa.

- FIGURA 49. Tendência evolutiva das inundações por ano para a cidade de Lisboa entre 1918 e 1998 e a sua distribuição espacial.
- FIGURA 50. Nº de inundações por década e por local inundado na cidade de Lisboa entre 1918/19-1997/98 e entre 1970/71-1997/98.
- FIGURA 51. Carta de vulnerabilidade à inundação urbana no Concelho de Lisboa.
- FIGURA 52. Danos em Alcântara após a precipitação de 18 de Fevereiro de 2008.
- FIGURA 53. Acumulação de água em diversas zonas baixas e danos nas diversas actividades durante as inundações de 28 de Outubro de 2010.
- FIGURA 54. Precipitação acumulada média mensal em Cascais no início do século XXI e projectada para o final do século XXI.
- FIGURA 55. Esquema dos diversos factores de influência no nível de maré do estuário.
- FIGURA 56. Esquema da relação entre a amplitude de maré, a frente ribeirinha de Lisboa e a projecção da subida do nível do mar local para 2050 e 2100.
- FIGURA 57. Maré-alta no Terreiro do Paço em tempo limpo e durante temporal.
- FIGURA 58. Variações da subida do nível do mar no marégrafo de Cascais entre 1880 e 2009.
- FIGURA 59. Movimentos verticais de Lisboa durante 1992 e 2003.

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1.	Resumo das projecções para 2050 e 2100 dos relatórios de especialistas para a SNMM, relativamente a 2000.
TABELA 2.	Projecções globais e regionalizadas para Lisboa, assumindo um desvio negativo de 10 cm para as estimativas entre 0.50-1.40 m.
TABELA 3.	Variações do nível da água no estuário do Tejo em metros e factores de influência.

LISTA DE ACRÓNIMOS

AIS	Manto de Gelo da Antártica (<i>Antarctica Ice Sheet</i>)
AR4	Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (<i>Fourth Assessment Report</i>)
IPCC	Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
GEE	Gases com efeito de estufa
GIA	Ajustamento isostático pós-glacial (<i>Glacial isostatic adjustment</i>)
GICs	Glaciares e calotas de gelo (<i>Glaciers and Ice Caps</i>)
NAO	Oscilação do Atlântico Norte (<i>North Atlantic Oscillation</i>)
NMM	Nível Médio do Mar
NM	Nível do Mar
SNMM	Subida do nível médio do mar
SRES	Relatório Especial Sobre Cenários de Emissões (<i>Special Report on Emission Scenarios</i>)
ONU	Organização das Nações Unidas

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Adaptação. Processo de ajustamento de sistemas humanos ou naturais a actuais ou expectáveis efeitos climáticos, de modo a moderar o dano ou explorar oportunidades benéficas (EEA 2012b).

Alterações climáticas. Mudança no estado do clima que pode ser identificada por alterações na média e/ou variabilidade das suas propriedades e que persiste durante um determinado período, geralmente de décadas ou mais. As alterações climáticas podem dever-se a processos naturais internos, a variações radiactivas externas, ou a mudanças antropogénicas persistentes na composição da atmosfera e/ou alterações do uso do solo (IPCC 2007a).

Cheia. Fenómeno hidrológico extremo, natural ou induzido pela acção humana, que consiste no transbordo de um curso de água relativamente ao seu leito original, originando a inundação das margens (Ramos 2007).

Cheia progressiva. Fenómeno hidrológico extremo em grandes e médios rios, resultante de precipitações intensas ou moderadas, prolongadas no tempo (dias a semanas), originando o transbordo das margens. Caracterizam-se pela sua relativa previsibilidade quando se verificam as condições meteorológicas indiciadoras (Saraiva 1999).

Cheia rápida ou “flash flood”. Fenómeno hidrológico extremo em pequenas bacias hidrográficas de regime torrencial, causadas por precipitações intensas de curta duração (horas) e de difícil previsibilidade (Ramos 2007).

Exposição. Presença de pessoas; meios de subsistência; serviços e recursos ambientais; infraestruturas; bens económicos, culturais ou sociais em locais que podem ser adversamente afectados (IPCC 2012).

Infraestrutura azul (aplicado à drenagem de águas pluviais). Sendo um conceito ainda em definição e normalmente associado aos ecossistemas em que o elemento água é dominante (sapais, lagos, rios, etc.), no presente trabalho é entendido como a estruturação de uma rede hidrológica ou de drenagem híbrida, complementar ou alternativa ao sistema artificial de drenagem urbana, baseada nas diversas tipologias de ocupação urbana (áreas verdes, áreas pavimentadas, edifícios, linhas de água, etc.). Podendo coincidir com a infraestrutura verde urbana, a sua definição é distinta, não se limitando aos serviços associados aos ecossistemas, podendo incluir sistemas criados pelo homem que não se baseiam nos processos naturais (cisternas, depósitos, canais, etc.).

Infraestrutura verde (aplicado à drenagem de águas pluviais). O conceito de infraestrutura verde ao nível da escala urbana consiste na delimitação ou planeamento de uma rede multifuncional de espaços verdes, à qual são associados diversos valores e benefícios que os processos naturais providenciam, nomeadamente em relação à poluição do ar e da água, biodiversidade, recreação, regulação do clima urbano, entre outros. Quando aplicado à drenagem de águas pluviais, o seu conceito relaciona-se com o valor dos processos naturais e ecológicos providenciados pelo solo e vegetação, em relação à gestão das inundações, à gestão da drenagem, à qualidade da água e à criação de ambientes urbanos mais saudáveis e sustentáveis (EEA 2011; EEA 2012b; EPA 2013).

Incerteza. Expressão do nível de desconhecimento em relação a um valor ou acontecimento. Pode resultar da falta de informação, do desacordo sobre o conhecimento das causas ou mesmo da possibilidade do seu conhecimento (IPCC 2007a).

Inundação. Submersão de uma superfície por água. Distinto de cheia pela origem do fenómeno, que não está obrigatoriamente relacionado com o transbordo da linha de água. A inundação pode ser atribuída a fenómenos fluviais, marítimos, climatológicos, antrópicos, hidrogeológicos, entre outros (Ramos 2007).

Inundação costeira. Fenómeno gerado pela subida temporária do nível do mar acima da amplitude normal da maré devido à ocorrência em simultâneo ou pontualmente de sobrelevação marítima, ondas, ventos ou tsunamis, levando ao galgamento da linha de costa e à inundação de zonas geralmente secas. A inundação costeira pode ocorrer num rio ou estuário, sendo distinta da inundação fluvial pela sua origem, resultando esta última, de um modo geral, da precipitação (NOAA 2013).

Inundação fluvial. Fenómeno gerado pela ocorrência de precipitação prolongada durante vários dias ou semanas, por fenómenos intensos durante um curto período de tempo (dias), ou pelo rápido derretimento de massas de gelo, resultando no alagamento das áreas circundantes, geralmente emersas, afectando a ocupação e actividade humana. A inundação fluvial pode ainda resultar da falha de uma estrutura de controlo da água, tal como um dique ou barragem (EEA 2012b).

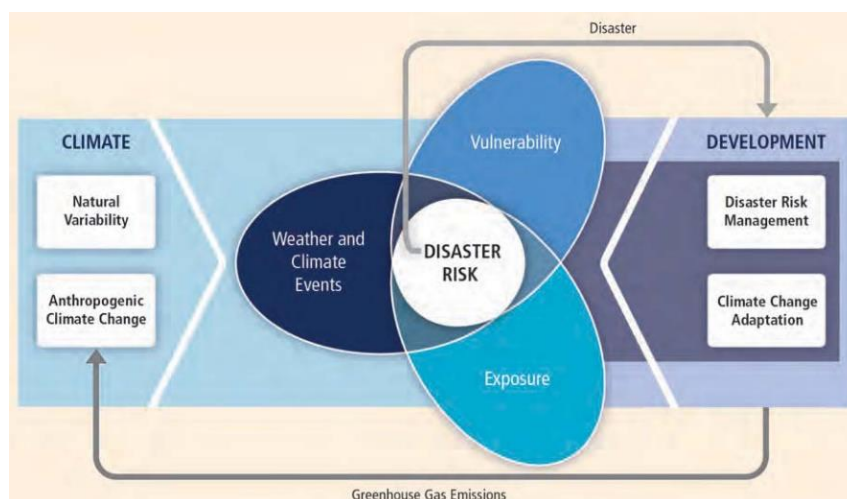
Inundações urbanas. Resultam de eventos de precipitação intensa e da insuficiência do sistema de drenagem artificial para escoar o caudal gerado, passando o excesso de água a circular pela superfície até às cotas inferiores. São exacerbadas pela impermeabilização ou saturação do solo, pelo subdimensionamento do sistema de drenagem ou pela sua perda de eficiência quando o ponto de descarga se encontra obstruído por um corpo de água (mar, rio, lago, etc.) (EEA 2012b).

Mitigação (das alterações climáticas). Intervenção humana para reduzir a produção ou aumentar a absorção dos gases com efeito estufa (IPCC 2012).

Nível Médio do Mar. Superfície média dos oceanos, medida pontualmente pela rede internacional de marégrafos, os quais são usados para definir o Datum altimétrico nacional de cada país com linha de costa. Desde 1993, esta superfície é ainda definida globalmente pelas técnicas de altimetria de satélite (Antunes 2012a).

Resiliência. A capacidade que um sistema e os seus componentes possuem para antecipar, absorver, acomodar ou recuperar dos efeitos adversos de determinado evento de forma eficiente e atempada, garantindo a preservação, restauro ou melhoria das suas estruturas e funções básicas (IPCC 2012).

Risco. Combinação das probabilidades de ocorrência de um evento e das suas consequências sobre um determinado sector, como a sociedade ou os ecossistemas (IPCC 2007c). Na óptica dos impactos das alterações climáticas, resulta da combinação entre a ocorrência de um evento climático, a exposição e a vulnerabilidade desse sector ao evento em causa. O esquema em baixo ilustra a relação entre estas componentes na formação do risco de desastre (IPCC 2012).



Sobreelevação meteorológica. Consiste na subida do nível do mar gerada pela baixa pressão atmosférica e pelo vento durante a ocorrência de tempestades. Nos locais em que se verificam tempestades intensas, a altura da sobrelevação pode atingir valores superiores a 6 m (USGS 2013).

Subsidiência. A subsidiência terrestre consiste no gradual assentamento ou rápido afundamento da superfície terrestre devido a movimentos subsuperficiais. As principais causas associadas são a compactação dos aquíferos devido a sua exploração, a drenagem de solos orgânicos, extração de gás, petróleo ou outras substâncias, compactação natural, movimentos tectónicos, entre outros (NOAA 2013).

Vulnerabilidade. Propensão ou predisposição para ser adversamente afectado (IPCC 2012).

INTRODUÇÃO

Justificação do tema

Ao longo da sua história, as cidades costeiras de deltas e estuários tiveram sempre de lidar com a ameaça de inundação marítima, fluvial e pluvial. Numa paisagem modelada pelo constante diálogo entre a terra e água, o Homem procurou encontrar um equilíbrio entre o risco de inundação e as vantagens inerentes a estes territórios. Com uma grande disponibilidade de importantes recursos naturais e uma localização estratégica nas rotas marítimas comerciais, as cidades de delta afirmaram-se como um pólo de desenvolvimento social e económico, favorecendo a sua grande expansão urbana e concentração populacional durante todo o século XX, dando origem a algumas das maiores metrópoles do mundo. No entanto, a sua manutenção e desenvolvimento encontra-se actualmente ameaçada pelos impactos físicos das alterações climáticas, constituindo importantes e novas ameaças para estes territórios.

As alterações climáticas previstas são diversas e geograficamente distribuídas, tais como a subida da temperatura média, a maior frequência de ondas de frio e calor, secas e inundações, a subida do nível médio do mar ou as alterações dos padrões de precipitação e tempestades (IPCC 2007). Estas alterações vão afectar todos os territórios de um modo geral, e as cidades de deltas e estuários em particular. A sua sensibilidade específica deve-se à conjugação da proximidade do nível do mar, à influência fluvial a que estão sujeitas e à dificuldade de escoamento das suas águas interiores que, conjuntamente, contribuem para um forte aumento dos diferentes riscos de inundação e colocam em causa um elevado número de população e de áreas urbanas em todo o mundo.

Os principais factores que contribuem para um aumento generalizado do risco de inundação nos deltas e estuários urbanizados são a subida do nível do mar e as alterações no regime de precipitação e tempestades, implicando uma maior exposição à inundação costeira, fluvial e pluvial, afectando sobretudo as frentes de água. Dos diversos riscos envolvidos, a inundação urbana das frentes de água constitui um dos principais problemas pela sua antecipação e

frequência, devido ao observado aumento dos fenómenos de precipitação intensa, à sensibilidade da drenagem destas faixas e à sua progressiva dificuldade de escoamento pela subida do nível do mar. Desta forma, a incapacidade de drenagem das águas pluviais constitui um risco já presente em muitas frentes de água e em progressivo agravamento, levando à integração de estratégias de adaptação urbana locais, implicando importantes mudanças na forma como a paisagem urbana realiza o escoamento das suas águas pluviais. Fortemente modeladas pela ocupação humana, as frentes de água não poderão ignorar as futuras dinâmicas hidrológicas e os seus respectivos impactos, sendo que parte destes estão já presentes ou são considerados inevitáveis, colocando em causa a manutenção de vastas áreas, assim como a segurança dos habitantes.

O presente trabalho pretende enquadrar a relevância desta problemática na adaptação urbana às alterações climáticas pela caracterização das actuais e futuras dinâmicas de escoamento nas frentes de água urbanizadas das cidades de delta e estuário, na óptica da sua integração no futuro planeamento. Enquanto num clima estável as problemáticas hidrológicas do meio urbano consolidado são geralmente remetidas para o foro técnico da especialidade ou para um difuso e impraticável ordenamento do território, no contexto das alterações climáticas, devido à velocidade e dimensão dos possíveis impactos, as cidades de frente de água vêem-se obrigadas a estabelecer novas relações hidrológicas.

A dimensão do problema implica que as cidades adoptem um planeamento de acordo com a evolução dos impactos, ao mesmo tempo flexível e concreto, e no qual a pratica espacial readquire um importante papel ao modelar e ao ser modelada pelos novos contextos hidrológicos. Perante a percepção da velocidade e dimensão dos impactos, o problema das inundações urbanas não pode ser enfrentado apenas por medidas que trabalham os processos hidrológicos de forma sectorial e nas suas consequências, como o aumento da capacidade de drenagem ou de estratégias de resistência contra a inundação. O acompanhamento dos futuros processos resultantes das alterações climáticas pela ocupação urbana beneficiará a sua manutenção no longo prazo, evitando o aumento da exigência colocada sobre as infraestruturas artificiais. Nesta óptica, a compreensão das relações existentes e potenciais entre os sistemas naturais, a infraestrutura de drenagem e a ocupação urbana na definição do escoamento hidrológico, permite estudar medidas mitigadoras mais eficientes e sustentáveis no longo prazo, pela integração dos processos hidrológicos e de gestão das águas pluviais no planeamento e desenho da paisagem urbana. As cidades de deltas e estuários podem assim beneficiar da adopção de medidas descentralizadas ou de reinterpretação da drenagem urbana, tornando-se menos dependentes da resposta infraestrutural 'tradicional', promovendo a flexibilidade urbana necessária para lidar com a incerteza dos futuros cenários climáticos.

A promoção dos processos ecológicos na atenuação do escoamento superficial adquire uma particular importância no contexto das alterações climáticas. Geralmente substituídos pela eficiência dos sistemas de drenagem, a sua reintegração torna-se essencial pelos diversos benefícios que podem compreender em relação às restantes alterações. A seca, a diminuição da

humidade, da biodiversidade, da qualidade da água ou as ilhas de calor urbano, são problemas partilháveis com a atenuação do risco de inundação pelos processos naturais, e cuja resposta é cada vez mais urgente. Não podendo a paisagem urbana ser entendida apenas como um problema hidrológico ou climático, alheio a uma realidade social, a escolha das estratégias e medidas de adaptação focar-se-á na análise de casos de estudo em que o problema das dinâmicas urbanas da água possui uma ligação e partilha com outros aspectos da cidade, como o espaço público, as funções sociais e culturais, o ambiente urbano e os espaços verdes. Desta forma, o presente trabalho pretende responder às seguintes questões:

- Como contribuem as alterações climáticas para o aumento do risco de inundação urbana nas frentes de água e qual a sua provável evolução?
- Qual o impacto das inundações pluviais no meio urbano nos futuros cenários climáticos?
- Quais são as principais estratégias e medidas de adaptação às alterações climáticas que permitem diminuir o risco de inundação urbana nas frentes de água?
- Como integrar os processos hidrológicos no desenho e planeamento urbano? Qual a importância dos processos naturais e ecológicos nas estratégias de adaptação?

De modo a contextualizar o problema, que depende de inúmeros factores locais e regionais, escolheu-se a frente ribeirinha de Lisboa como objecto de estudo. Esta escolha deveu-se ao facto de ser uma cidade costeira de estuário, consolidada, muito dependente do sistema de drenagem artificial, com recorrentes problemas de inundações urbanas na sua faixa costeira, onde se concentra um elevado número de população e actividades, e por o risco de inundação urbana constituir uma ameaça crítica à sua manutenção e desenvolvimento. Contribuíram ainda para a sua escolha a existência de estudos sobre as inundações urbanas e sobre os efeitos das alterações climáticas na frente ribeirinha, assim como a disponibilidade de elementos climatológicos, oceanográficos e cartográficos.

O presente trabalho parte da hipótese de que no contexto das alterações climáticas existe uma relação crítica entre o risco de inundação pluvial das frentes de água urbanizadas de deltas e estuários e a gestão urbana da drenagem. A sua compreensão é essencial para o estabelecimento de estratégias de adaptação que visem evitar respostas no âmbito estrito da protecção civil, assim como um progressivo abandono de importantes áreas urbanas ou a crescente extensão dos impactos das inundações. Tendo em conta os objectivos propostos, estruturou-se o trabalho da seguinte forma:

O capítulo 1 enquadra a problemática geral das alterações climáticas na actualidade e a sua influência nos factores que vão contribuir para o aumento do risco de inundação urbana nas

frentes costeiras de deltas e estuários, nomeadamente os padrões de precipitação e a subida do nível do mar.

No capítulo 2 enquadram-se na generalidade a relevância do risco de inundação pluvial urbana nas frentes de água, assim como os princípios gerais das estratégias e medidas de adaptação existentes e a sua integração na paisagem urbana.

No capítulo 3 analisam-se os possíveis impactos das alterações climáticas no risco de inundação pluvial urbana da frente ribeirinha de Lisboa, e a sua relação com o actual sistema de drenagem, na óptica da relevância da integração do problema no futuro planeamento urbano.

A conclusão reflecte sobre a necessidade de encontrar soluções ao nível do desenho e planeamento urbano que integrem os processos hidrológicos ao nível do escoamento e retenção de águas pluviais, contribuindo para a atenuação do risco de inundação urbana no contexto das alterações climáticas.

Metodologia

Para responder à questão formulada pela hipótese do presente trabalho, foi necessário recorrer a uma síntese de diversos campos de investigação, tendo como base as relações entre os seguintes temas: (a) as alterações climáticas e os factores que aumentam o risco de inundação urbana nas cidades costeiras de deltas e estuários; (b) a gestão urbana das águas pluviais nas frentes de água e a sua relação com os extremos de precipitação e a subida do nível do mar; e (c) a gestão da água nas estratégias e medidas de adaptação às alterações climáticas ao nível do planeamento e do projecto de espaço urbano. A pesquisa baseou-se na recolha e síntese de literatura sobre o estado da arte das alterações climáticas, nomeadamente na sua relação com as inundações urbanas em deltas e estuários, assim como na recolha de literatura sobre as estratégias e medidas de adaptação existentes. A contextualização para a frente ribeirinha de Lisboa requereu a recolha de informação específica, tendo em conta os aspectos relacionáveis com a presente interacção entre a cidade e a água, tanto a nível regional como local, e com especial incidência nas inundações urbanas. De um modo geral, a pesquisa baseou-se na recolha de elementos bibliográficos e na análise territorial da frente ribeirinha, relacionando os presentes fenómenos de inundação com as futuras alterações climáticas.

A abordagem ao problema passou pelos seguintes passos:

- Recolha e síntese da investigação científica global e regional relacionada com as alterações climáticas e os factores que influenciam o risco de inundação urbana em deltas e estuários, nomeadamente a subida do nível do mar e as alterações de precipitação.
- Recolha e síntese de informação sobre a relação entre a drenagem urbana e o risco de inundação pluvial em frentes de água, no contexto das presentes e futuras alterações climáticas.
- Recolha e síntese de informação sobre diferentes estratégias e medidas de adaptação em deltas e estuários urbanizados, com especial enfoque no planeamento urbano e na importância dos processos ecológicos no futuro contexto climático.
- Recolha e síntese de informação sobre as inundações urbanas da frente ribeirinha de Lisboa e a sua relação com os extremos de precipitação e o funcionamento do sistema de drenagem artificial.
- Análise dos efeitos das alterações climáticas nas dinâmicas de drenagem da frente ribeirinha de Lisboa e as suas possíveis implicações para o risco de inundação urbana.

A pesquisa e análise apresentadas foram realizadas procurando responder às seguintes questões:

- Qual a influência das alterações climáticas nos factores que contribuem para o risco de inundação das frentes de água em cidades de deltas e estuários? Qual a velocidade e a dimensão das alterações desses factores?
- Quais os processos envolvidos no aumento do risco de inundação urbana das frentes de água? Quais os principais impactos?
- Qual a importância do risco de inundação pluvial urbana em relação à inundação costeira e fluvial nos deltas e estuários?
- Como podem as frentes de água urbanizadas lidar simultaneamente com o aumento de precipitação e a diminuição do potencial da drenagem artificial no contexto das alterações climáticas? Podem estas continuar a depender destes sistemas? E qual a sua importância na especificidade do contexto hidrológico e da velocidade das alterações climáticas em Lisboa?
- Que estratégias e medidas de adaptação podem contribuir para a gestão do risco de inundação das frentes de água urbanizadas? Quais as vantagens e como integrar o problema no planeamento e no projecto urbano?
- Qual a relevância dos processos ecológicos na redução do risco de inundação urbana no contexto das alterações climáticas?

CAPÍTULO I

Alterações climáticas e o risco de inundação urbana em deltas e estuários

As alterações climáticas constituem actualmente um dos mais importantes fenómenos globais devido aos diversos impactos físicos que podem repercutir no território e no suporte dos ecossistemas, no qual se inclui o ser humano. A sua percepção refere-se às mudanças no estado regular do clima pela variação das suas propriedades ao longo de um determinado período de tempo. As suas causas podem ser devido a processos naturais ou à influência humana, através da alteração da composição da atmosfera, sendo as actuais alterações climáticas são associadas às mudanças provocadas pelo homem, resultantes da emissão de gases com efeito estufa (GEE) (IPCC 2007a). A mudança do estado regular do clima tem como consequência diversos e distribuídos fenómenos, tais como o aumento da temperatura, ondas de frio e calor, secas, aumento das precipitações intensas, tempestades, entre outros, implicando importantes alterações e impactos em todos os sistemas, com consequências que podem ser fortemente disruptivas e que colocam em causa o desenvolvimento social, económico e humano de um grande número de população.

Sendo que muitos dos impactos estão já presentes ou são considerados inevitáveis, os territórios, nos quais se incluiu o urbano, terão de se adaptar às presentes e futuras alterações na óptica de minimizarem os seus efeitos mais negativos. Neste aspecto, as cidades constituem um dos territórios mais expostos devido à sua elevada concentração populacional. Não se podendo afirmar como inconscientes em relação às alterações climáticas, as cidades terão de compreender os impactos a que estarão cada vez mais sujeitas, as suas vulnerabilidades e as possibilidades de adaptação, de modo a poderem continuar a constituir-se como pilares de desenvolvimento e de bem-estar social.

Mas se as alterações climáticas implicam importantes impactos nos territórios em geral e nas cidades em particular, estes são bastante agravados nos casos dos deltas e estuários. Sujeitos à influência marítima, fluvial e pluvial, a sua proximidade do nível do mar, o relevo geralmente aplanado e a elevada concentração populacional, tornam estes locais muito expostos aos fenómenos de inundação, colocando em causa a segurança de milhões de habitantes e a manutenção de vastas áreas urbanas. Desta forma, as alterações climáticas representam uma importante ameaça pela presente e projectada subida do nível médio do mar (SNMM), pelo

aumento da intensidade das tempestades, pelas alterações de precipitação que ampliam abruptamente os caudais dos rios e pelo aumento da frequência e intensidade dos picos de precipitação. Dos diversos riscos de inundação a que as cidades de deltas estão sujeitas, a inundação urbana das frentes de água constitui um dos principais problemas pela sua antecipação e frequência, uma vez que a alteração da intensidade de precipitação é um dos fenómenos presentemente mais observados e sentidos e, em conjugação com a subida do nível do mar, implicará um aumento exponencial do seu risco. Desta forma, pretende-se compreender qual a influência das alterações climáticas nos factores que fazem aumentar o risco de inundação urbana e qual a sua previsível evolução temporal, nomeadamente nas alterações dos padrões de precipitação e na SNMM, constituindo parte essencial da hipótese em estudo.

O fenómeno será abordado na sua generalidade devido à estreita relação entre os factores em estudo e a evolução global do clima, mas tendo sempre como foco as relações que contribuem para a alteração dos fenómenos de inundação nas frentes de água. Sendo as alterações climáticas geograficamente distribuídas, será dada particular atenção ao caso europeu e português, para enquadramento dos principais exemplos e do caso de estudo de Lisboa.

1.1. Principais causas, projecções e impactos das alterações climáticas

Ao longo da história da Terra, o clima sofreu grandes variações tais como os períodos glaciares e interglaciares registados nos últimos 800.000 anos. Actualmente, o clima encontra-se num período interglaciar, iniciado há cerca de 20.000 anos, e que apresenta uma grande estabilidade nos últimos 8.000 anos, sendo caracterizado como um “longo Verão”. A grande expansão da Humanidade e da civilização corresponde à estabilidade deste período, no qual o Homem encontrou as condições mais favoráveis para o desenvolvimento e expansão das suas sociedades por todo o globo (Santos 2006, p. 12).

No entanto, a presente estabilidade climática encontra-se actualmente comprometida pela alteração da composição atmosférica devido à acção humana. As variações observadas nos últimos 100 anos, não se enquadram na variabilidade climática natural dos últimos 1000 anos, sendo actualmente considerado como inequívoco que as emissões antropogénicas constituem uma das causas mais importantes das presentes alterações (IPCC 2007a). Enquanto as variações climáticas naturais são consequência da própria variabilidade interna do sistema climático ou das diferenças de forçamento radiativo devido às alterações orbitais do planeta, as variações climáticas com origem antropogénica são induzidas pelo aumento exponencial das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), resultante do uso generalizado de combustíveis fósseis e da extensiva alteração do uso do solo. A elevada concentração deste tipo de gases na atmosfera, contribui para o agravamento do forçamento radiativo, sendo o fenómeno descrito

como efeito de estufa, tendo como consequência o aumento da temperatura global da atmosfera, oceanos e superfície terrestre. As observações realizadas estimam que entre 1906 e 2005, a temperatura global tenha aquecido cerca de 0.74°C , com uma forte tendência de aumento nas últimas décadas, coincidente com o aumento de emissões de GEE (Figura 1) (IPCC 2007a). A atribuição da rápida subida da temperatura ao forçamento radiativo de origem antropogénica é reforçada pela actual ausência de variações na irradiação solar e pela observação de um aquecimento global e simultâneo em todos os componentes do planeta, não podendo a amplitude e a consonância das alterações ser atribuída à variabilidade natural ou a um forçamento externo (Figura 2).

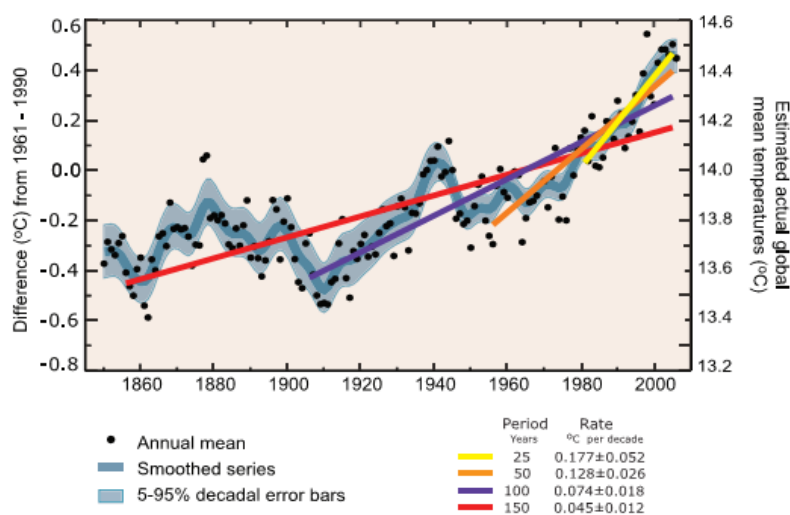


FIGURA 1. Evolução da temperatura média global em $^{\circ}\text{C}$. Fonte: IPCC (2007a).

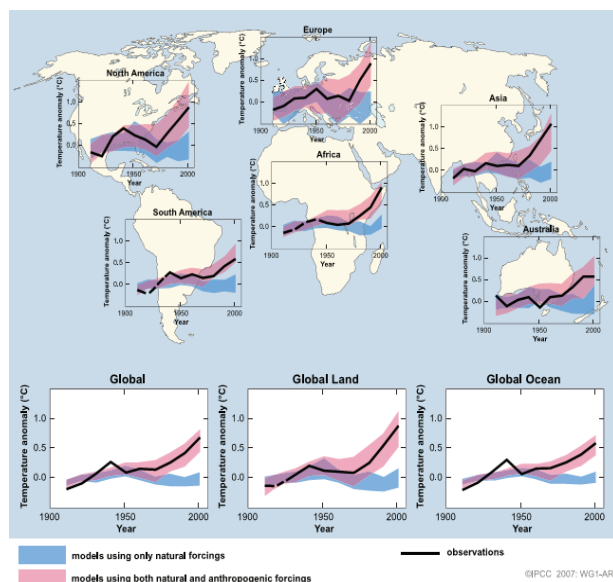


FIGURA 2. Comparação da temperatura observada e simulada por modelos climáticos com forçamentos antropogénicos e naturais para o período de 1906-2005. Fonte: IPCC (2007a).

O fenómeno foi institucionalmente reconhecido em 1988, através da formação do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC), sobre a égide da ONU. A agregação da informação relativa à investigação das alterações climáticas passou a ser realizada pelo IPCC, divulgando-a através da edição periódica de relatórios, descrevendo as causas e a evolução do fenómeno, assim como os possíveis cenários futuros¹. A sua investigação passou a ser realizada a nível internacional, sendo aceite que as consequências das alterações climáticas se estendem a todo o planeta através da alteração do equilíbrio energético do clima, afectando todos os ecossistemas.

O aumento global da temperatura implicou diversas alterações, tendo estas sido directamente observadas em diversos fenómenos, tais como a diminuição do gelo do mar do Ártico, o recuo generalizado dos mantos de gelo da Gronelândia e dos glaciares de montanha ou a aceleração da subida do nível do mar, que passou de 1,7mm/ano durante o século XX para 3,2mm/ano nas últimas duas décadas. No entanto, os seus efeitos encontram-se ainda relacionados com alterações indirectamente ou dificilmente perceptíveis, como a diminuição global das áreas cobertas pelo gelo e neve, o aumento do número de dias quentes, a alteração dos padrões de vento e chuva, o aumento generalizado de precipitações extremas, o aumento do número e intensidade de eventos extremos (secas, ondas de frio e calor, tempestades, furacões, ciclones...), a acidificação e o aquecimento dos oceanos, entre outros (IPCC 2007a). Os impactos das alterações observadas são geograficamente distribuídos e com maior incidência em algumas regiões do globo. A título exemplificativo destas assimetrias, pode-se referir o aumento significativo da temperatura superficial no Ártico (cerca de 3 °C), em algumas regiões de África e no Hemisfério Norte; o aumento de precipitação no Este da América do Norte e do Sul, no Norte da Europa e no Norte e Centro da Ásia, assim como a sua diminuição no Sahel, no Mediterrâneo, no Sul de África e em partes do Sul da Ásia (IPCC 2007a).

Para compreender a futura evolução climática e a sua relação com as emissões de GEE, a comunidade científica construiu modelos de circulação geral (GCM) que simulam o comportamento dos principais componentes climáticos, os oceanos e a atmosfera, permitindo antecipar as prováveis respostas ao futuro forçamento antropogénico. Uma vez que o forçamento depende da concentração de GEE na atmosfera, foram elaborados cenários de emissões relacionados com o desenvolvimento socioeconómico e de governação, apelidados de SRES e RCP's² (IPCC 2000; Meinshausen, Smith et al. 2011). Os cenários permitem compreender a evolução da temperatura em relação às emissões e, através dos modelos

¹ O IPCC editou relatórios climáticos em 1990 (FAR), 1995 (SAR), 2001 (TAR) e 2007 (AR4).

² Os RCP's (Representative Concentration Pathways) constituem uma actualização das emissões e da sua sensibilidade em relação aos SRES (Special Report on Emission Scenarios).

climáticos, projectar as futuras alterações de um determinado fenómeno, como a subida do nível do mar, as alterações de precipitação ou o aumento de períodos de seca³.

As projecções apontam a continuação das tendências já observadas nos principais componentes climáticos, dependendo a sua evolução e intensidade dos diversos cenários de emissões. De um modo geral, o aumento da temperatura média global até ao final do século XXI é maior nas regiões continentais do que nos oceanos, estimando-se uma subida entre 1.1 e 6.4 °C, sendo esta maior nos pólos, nas áreas continentais do hemisfério Norte e no mar do Ártico, onde se prevê um aumento de 4 a 7 °C (Figura 3). O maior aumento nas áreas continentais irá diminuir a amplitude térmica das zonas terrestres, implicando uma maior probabilidade de ondas de calor e secas. Para a Europa as projecções indicam um aumento de temperatura entre os 2,5 e o 4,0 °C e com um impacto mais acentuado na região Mediterrânica e Portugal (EEA 2012a). Mas a alteração do equilíbrio climático afecta ainda a distribuição espacial da precipitação, aumentando os seus valores anuais nas latitudes altas, algumas zonas equatoriais e sudeste da Ásia, e diminuindo nas latitudes médias e no mediterrâneo (Figura 4). O aumento da temperatura implica também a subida do nível do mar, como consequência da expansão térmica dos oceanos e do derretimento de massas de gelo (mantos e glaciares), estimando-se um aumento global de 0.18 a 0.59m até ao final do século (Figura 5) (Santos e Miranda 2006; IPCC 2007a).

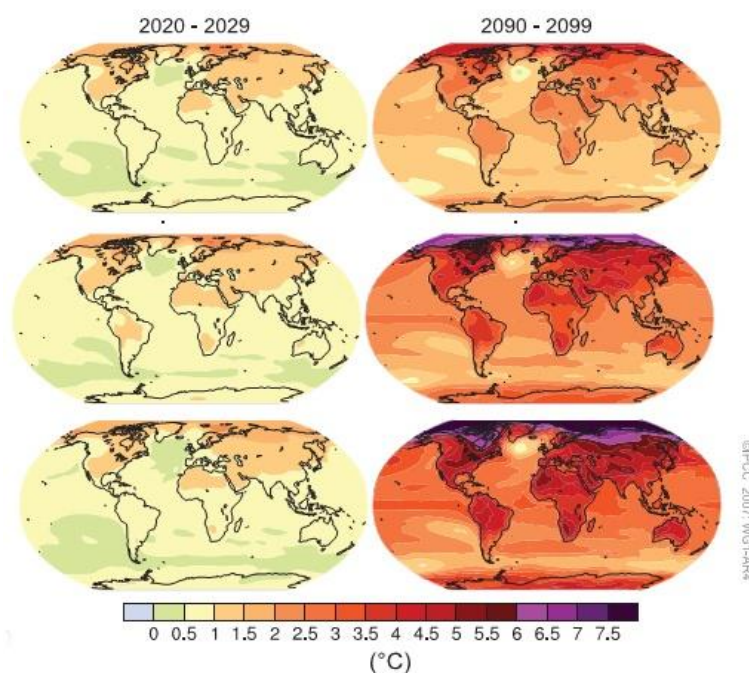


FIGURA 3. Projecção do aquecimento médio da superfície para 2020-2029 e 2090-2099 para os cenários B1 (topo), A1B (meio) e A2 (inferior). Fonte: IPCC (2007a).

³ Os cenários B1 e B2 são os que implicam um forçamento radiativo menor, sendo o inverso para os A1FI e A2 (SRES). Nos cenários RCP, o número equivale ao forçamento, sendo este tanto menor quanto menor for o número, variando entre RCP2.6 e RCP8.5

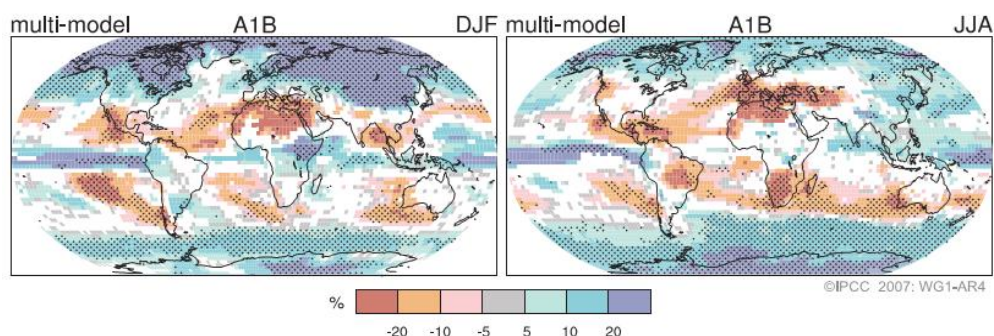


FIGURA 4. Alteração relativa na precipitação para o final do séc. XXI em relação a 1980-1999. Valor em percentagem para o cenário A1B em Dez.-Fev. (esquerda) e Jun.-Ago. (direita). Fonte: IPCC (2007a).

Case	Temperature Change (°C at 2090-2099 relative to 1980-1999) ^a		Sea Level Rise (m at 2090-2099 relative to 1980-1999)
	Best estimate	Likely range	Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
Constant Year 2000 concentrations ^b	0.6	0.3 – 0.9	NA
B1 scenario	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
A1T scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
B2 scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
A1B scenario	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2 scenario	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI scenario	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

FIGURA 5. Projecção do aquecimento global médio e da subida do nível do mar para o final do séc. XXI. Fonte: IPCC (2007a).

As alterações apontadas pelas projecções implicam importantes impactos territoriais em todos os cenários, afectando os recursos hídricos, a manutenção dos ecossistemas e dos seus serviços, a saúde humana, as áreas costeiras e urbanas, afectando transversalmente todas as actividades que suportam o desenvolvimento humano e económico (agricultura, florestas, indústrias, etc.) (IPCC 2007; Alcoforado, Andrade et al. 2009). A pesquisa científica aponta que para serem evitados os piores impactos, o aumento de temperatura não deverá ultrapassar os 2 °C no curto prazo em relação ao período pré-industrial, devendo o seu valor manter-se nos 1,5 °C no longo prazo. O valor de 2 °C é considerado como o limite para se evitar uma interferência antropogénica perigosa sobre o sistema climático, sendo que, acima deste, se considera que os impactos são graves e globais, afectando fortemente os recursos hídricos de diversas regiões, a biodiversidade, os ecossistemas e os sistemas costeiros através da subida do nível do mar, colocando em risco um elevado número de população e o desenvolvimento humano das futuras gerações (Santos et al. 2006; UNFCCC 2011).

De modo a não ultrapassar este valor, têm sido feitos diversos esforços de mitigação das alterações climáticas através de acordos de redução das emissões de GEE. Fortemente impulsionado pela União Europeia e pela ONU, o protocolo de Quioto previa a redução de 5%

das emissões em 2012 em relação a 1990, sendo regulado através de um mercado de emissões. No mesmo sentido, a comunidade internacional rectificou o acordo pós-Quito, na conferência de Cancun, reafirmando a necessidade de manter o aumento da temperatura global num valor inferior a 2 °C (UNFCCC 2011). No entanto, o desenvolvimento de nações emergentes como a China, o Brasil e a Índia, ou a não ratificação do acordo pelos EUA e a Austrália, não permitiriam atingir as metas esperadas, implicando um crescimento exponencial das emissões. Os actuais valores de CO₂, de 395.5 ppm (Tans, Keeling et al. 2013), e a ausência de um consenso político e económico quanto à sua redução, indicam como muito provável um agravamento da temperatura acima dos 2 °C, sendo que a actual progressão de emissões corresponde aos piores cenários, A1FI e RCP8.5. A manterem-se os actuais padrões de emissões, e caso não se adoptem rapidamente fortes medidas de mitigação, a temperatura global poderá atingir os 4 e 5 °C no final do século, o que teria consequência muito graves ao nível global, dificultando ainda as opções de adaptação (Peters, Andrew et al. 2013).

Apesar dos esforços de mitigação que possam existir no futuro próximo, é actualmente perceptível que muitos dos impactos das alterações climáticas já não podem ser evitados. Os impactos físicos resultantes das emissões já decorridas implicam um agravamento da temperatura global em pelo menos 0.8 °C até ao final do século, assim como a continuação da subida do nível médio do mar durante as próximas décadas (World Bank 2012). Este 'comprometimento' deve-se à persistência dos GEE durante cerca de 100 anos na atmosfera, continuando os efeitos do forçamento radiativo mesmo que as emissões cessam no imediato, e à elevada inércia dos oceanos, cujo calor é lentamente libertado, podendo demorar séculos até restabelecer o anterior equilíbrio (Santos et al. 2006; IPCC 2007a). A tendência das emissões actuais pode ainda implicar um agravamento dos fenómenos extremos já registados na última década, tais como secas, ondas de calor, maior frequência de ciclones, ventos fortes, tempestades e precipitações mais intensas e/ou mais frequentes (Rahmstorf e Coumou 2012; EEA 2012a).

A presente evolução das alterações climáticas é particularmente grave para os deltas e estuários, implicando impactos progressivamente maiores. Para além dos restantes impactos já mencionados (secas, ondas de calor, etc.), a aceleração da subida do nível do mar implica o aumento da inundação e erosão costeira, a intrusão da água salgada para terrenos cada vez mais interiores e a alteração dos ecossistemas, colocando em risco o suporte de diversas actividades produtivas e a manutenção de muitas cidades costeiras, estimando-se que afecte directa ou indirectamente centenas de milhões de pessoas. Nas regiões sujeitas a aumentos de precipitação no Inverno ou a precipitações extremas, o seu agravamento implicará o aumento das inundações fluviais e pluviais das zonas baixas, afectando áreas cada vez maiores. O aumento da temperatura pode ainda estar relacionado com o aumento da intensidade dos furacões e ciclones, colocando em risco milhões de habitantes das zonas costeiras (Santos et al. 2006; IPCC 2007a).

De modo a diminuir os impactos das alterações climáticas na sua generalidade, é cada vez mais urgente a implementação de uma estratégia de mitigação consistente que permita evitar os impactos mais extremos ao nível global. Apesar da agenda de adaptação depender do sucesso da mitigação, dada a compreensão da inevitabilidade de muitos dos impactos, a sua relevância é também cada vez maior, sobretudo nas regiões mais afectadas e vulneráveis. Nesta perspectiva, as cidades tem de se preparar para lidar com fenómenos das alterações climáticas na sua generalidade e em particular com os que colocam em causa a segurança dos seus habitantes, tais como as inundações ou o exacerbar das ilhas de calor urbano. A tendência actual das emissões implica que muitos destes impactos sejam cada vez mais acentuados e inevitáveis, obrigando as cidades a lidar localmente com as suas consequências.

Dos diversos impactos que as cidades estão sujeitas, e que não devem ser olhados de forma isolada, um dos já presentes é a inundação urbana das frentes de água. As alterações já observadas nos extremos de precipitação e a subida do nível do mar, implicam importantes mudanças na forma como as cidades realizam a sua drenagem, dando origem a frequentes inundações urbanas nas zonas baixas. Para compreender a sua evolução e posteriormente transpor os seus impactos para as frentes de água, caracteriza-se seguidamente as alterações já observadas em ambos os factores assim como as principais indicações das projecções.

1.2. Alterações na precipitação e tempestades

O risco de inundação urbana encontra-se directamente relacionado com as alterações de precipitação já observadas e projectadas. As alterações climáticas contribuem para uma mudança nos valores médios de precipitação, assim como para a alteração dos seus extremos. Uma vez que os sistemas de drenagem são dimensionados para valores máximos históricos, a alteração destes limites, pelo aumento da sua intensidade ou frequência, implica um maior número de inundações. As mudanças nas tempestades também contribuem para um aumento do número de inundações urbanas nas cidades costeiras, uma vez que sobrelevações ou ondulações mais frequentes ou maiores, aumentam as dificuldades de escoamento.

As alterações climáticas já observadas provocaram uma forte alteração dos padrões de precipitação anual, com grandes aumentos e diminuições em determinadas regiões. De um modo geral, as observações realizadas ao longo do século XX apontam para uma tendência de aumento no Hemisfério Norte, afectando o Norte e Centro da Europa, e um acentuado decréscimo no Sul da Europa e Norte de África, estando esta distribuição associada a modificações na circulação oceânica, regimes de ventos e à circulação atmosférica do vapor de água. As consequências são diversas, tais como o aumento do período de secas durante o Verão, a diminuição da qualidade e quantidade dos recursos hídricos e o aumento generalizado dos fenómenos de inundação, embora com vincadas distribuições regionais. De acordo com os

padrões observados, em Portugal a precipitação diminuiu consideravelmente entre 1971 e 2000, cerca de 10% em relação a 1941-1970, nomeadamente no mês de Março (Santos et al. 2006). Esta variação encontra-se fortemente ligada às oscilações do Atlântico Norte, regulada pela circulação oceânica e regimes de ventos, cujo índice tem sido positivo durante os períodos mais secos, tendo no entanto invertido o seu sinal na última década (Figura 7).

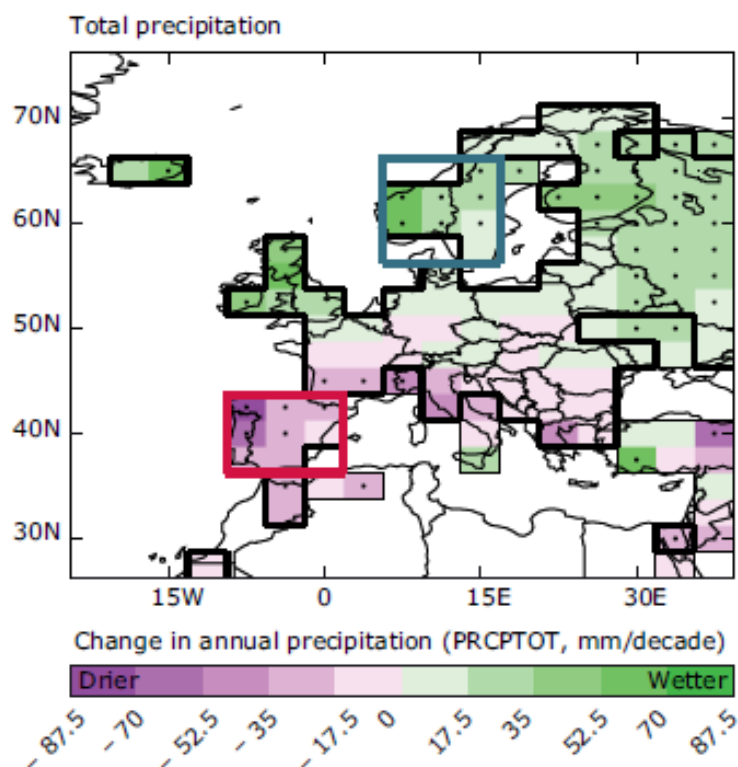


FIGURA 6. Tendência da precipitação anual entre 1960 e 2012. Fonte: EEA (2012a).

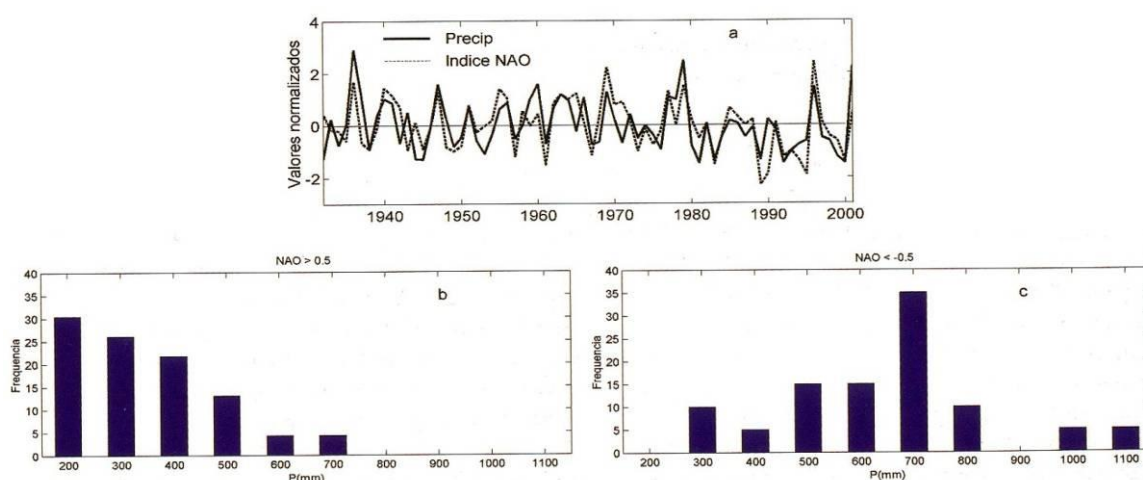


FIGURA 7. Precipitação entre Dezembro e Março em Portugal e relação com o índice NAO (Oscilação do Atlântico Norte), multiplicado por -1 para facilitar a comparação com a precipitação. Fonte: Santos et al. (2006)

Apesar das acentuadas diferenças regionais na distribuição da precipitação anual, verificou-se o aumento global dos fenómenos de precipitação concentrada, dando origem a um maior número de inundações urbanas, mesmo nos locais onde os valores anuais decresceram (IPCC 2007). O princípio físico subjacente à alteração da intensidade de precipitação é relativamente simples. Uma atmosfera aquecida pode conter uma maior quantidade de vapor de água, cerca de 6 a 7% por cada °C de aquecimento na superfície terrestre, implicando a ocorrência de chuvas mais intensas. Com base no aquecimento observado do oceano, calcula-se que a atmosfera contenha actualmente mais 5% de vapor de água, dando origem a uma maior frequência de precipitações intensas. Desta forma, no contexto das alterações climáticas, enquanto a temperatura continuar a aumentar, a intensidade de precipitação também deverá aumentar, contribuindo para um maior risco de inundação (Allan 2011). As observações recentes confirmam o princípio físico subjacente, apontando para um aumento global da média das precipitações extremas entre 5.9 e 7.7% por °C de temperatura média entre 1900 e 2009, com maior incidência nos trópicos e nas latitudes altas (Westra, Alexander et al. 2012).

O aumento da precipitação média e extrema é particularmente evidente no Norte da Europa, tendo implicado períodos mais prolongados de chuva e também eventos mais intensos, resultando em recorrentes inundações fluviais e urbanas, com maior gravidade nos anos 2000, 2002, 2007 e 2011 (EEA 2012b). No Sul da Europa, apesar da diminuição da precipitação anual, o aumento da frequência das chuvas intensas também originou diversas catástrofes, tais como as recentes inundações em Itália e no Sul de Espanha. De um modo geral, as inundações ocorrem quando os períodos de precipitação são mais concentrados, seja durante um dia ou uma semana, tendo o fenómeno sido recorrente na última década. Desta forma, a diminuição da precipitação média não pode ser directamente relacionada com os fenómenos de inundação urbana, tendo-se inclusivamente verificado um aumento simultâneo de períodos de seca e de inundação em algumas regiões do Mediterrâneo. Ao contrário das alterações de precipitação anual, que abrangem grandes regiões, os fenómenos de precipitação intensa são mais localizados e dependentes de efeitos locais, pelo que a sua distribuição não é necessariamente coincidente (Figura 8).

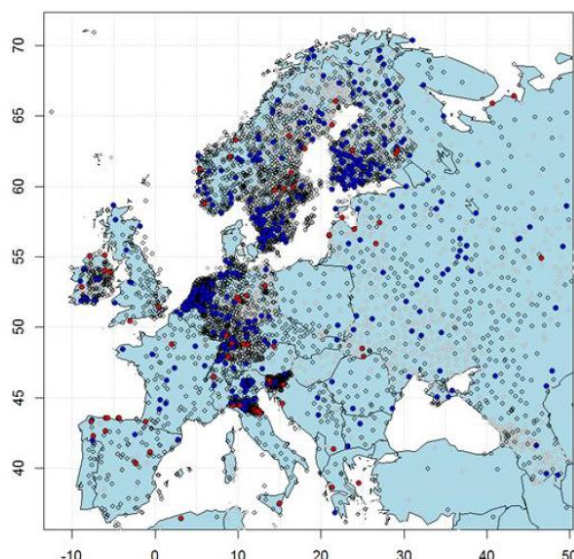


FIGURA 8. Alteração nos eventos de precipitação extrema entre 1900 e 2009. Os pontos azuis indicam um aumento dos extremos, os vermelhos uma diminuição e os vazios não indicam uma alteração significativa. Para o período de estudo, não se registaram alterações significativas em Portugal. Fonte: Westra 2013.

Devido a uma grande variabilidade temporal e regional da precipitação, fortemente determinada pelos ciclos do El Niño e as oscilações do Atlântico Norte, as projecções dos modelos climáticos apenas permitem apontar para tendências gerais, sendo muito difícil a determinação dos eventos extremos ao nível local e com precisão temporal. De um modo geral, os modelos apontam com segurança para a continuação das tendências de alteração já observadas da precipitação média, com aumentos para o Norte da Europa e diminuição para a zona Mediterrânea, com impactos importantes ao nível da disponibilidade hídrica para Portugal, onde se prevê um decréscimo de cerca de 30 a 40% para grande parte do país (Figura 9). Apesar das limitações na determinação dos eventos extremos, os modelos climáticos indicam um aumento generalizado e global da precipitação intensa ao longo de todo o século XXI, seguindo os princípios físicos subjacentes à sua ocorrência. Como exemplo extremo, as projecções apontam para o aumento de 40% na intensidade de precipitação para um período de retorno de 100 anos no cenário A2 para a cidade de Copenhaga (City of Copenhagen 2011). No caso da região Mediterrânica e de Portugal, a frequência de episódios extremos deverá aumentar, principalmente no Inverno, prevendo-se que uma precipitação com um período de retorno de 20 anos passe a ocorrer entre 15 a 18 anos em todos os cenários, sendo a sua intensidade igualmente agravada em cerca de 10 a 20% no Inverno (Figura 10) (IPCC 2012; EEA 2012a). Alguns estudos apontam ainda que a frequência dos eventos extremos poderá ser maior do que a projectada pelos modelos climáticos, prevendo que o número das maiores precipitações anuais possa duplicar ainda durante este século (Min, Zhang et al. 2011; Shiu, Liu et al. 2012).

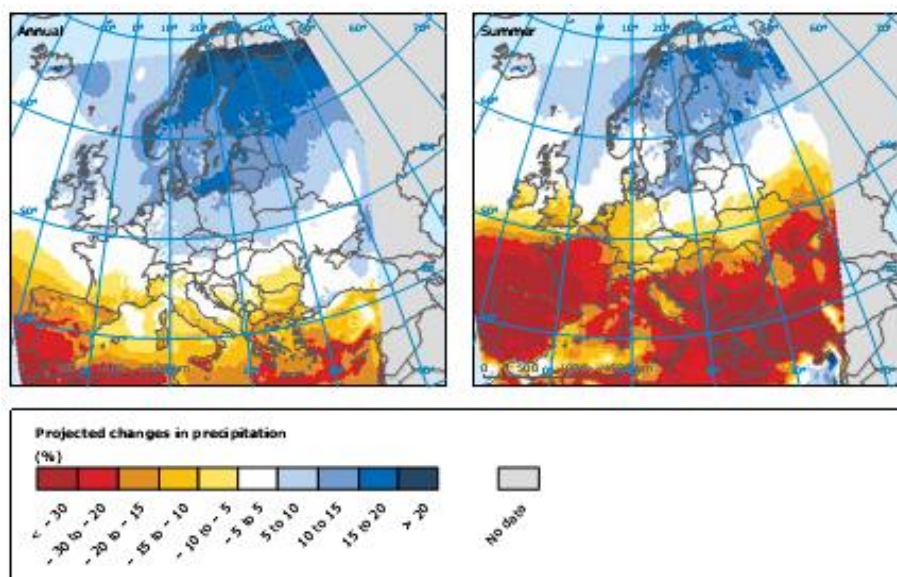


FIGURA 9. Projecções das alterações na precipitação anual (esquerda) e de Verão (direita) entre 1961–1990 e 2071–2100 para a Europa. Fonte: EEA (2012a).

Mas os deltas e estuários, assim como as cidades costeiras em geral, encontram-se ainda ameaçados pelo aumento da intensidade das tempestades, que podem combinar sobreelevações meteorológicas com fortes precipitações, aumentando o risco de inundação urbana existente. As alterações na quantidade de vapor de água na atmosfera, causadas pelo aumento da temperatura, implicam também um aumento da intensidade das tempestades e furacões. As observações e projecções apontam com alguma segurança o aumento da intensidade deste tipo de fenómenos nas áreas extra-tropicais, assim como um deslocamento da sua trajectória para norte no Oceano Atlântico, tal como tem sido observado no último meio século, afectando sobretudo a Europa Central e do Norte, e o Norte dos EUA. Contrariamente, na Península Ibérica prevê-se a diminuição do potencial das tempestades (Figura 10). Devido à proximidade do nível da água e ao seu relevo geralmente aplanado, o aumento da sobreelevação, conjugado com a SNMM, pode implicar um significativo aumento da exposição dos deltas à inundação costeira, podendo dar origem a eventos pontuais com consequências catastróficas.

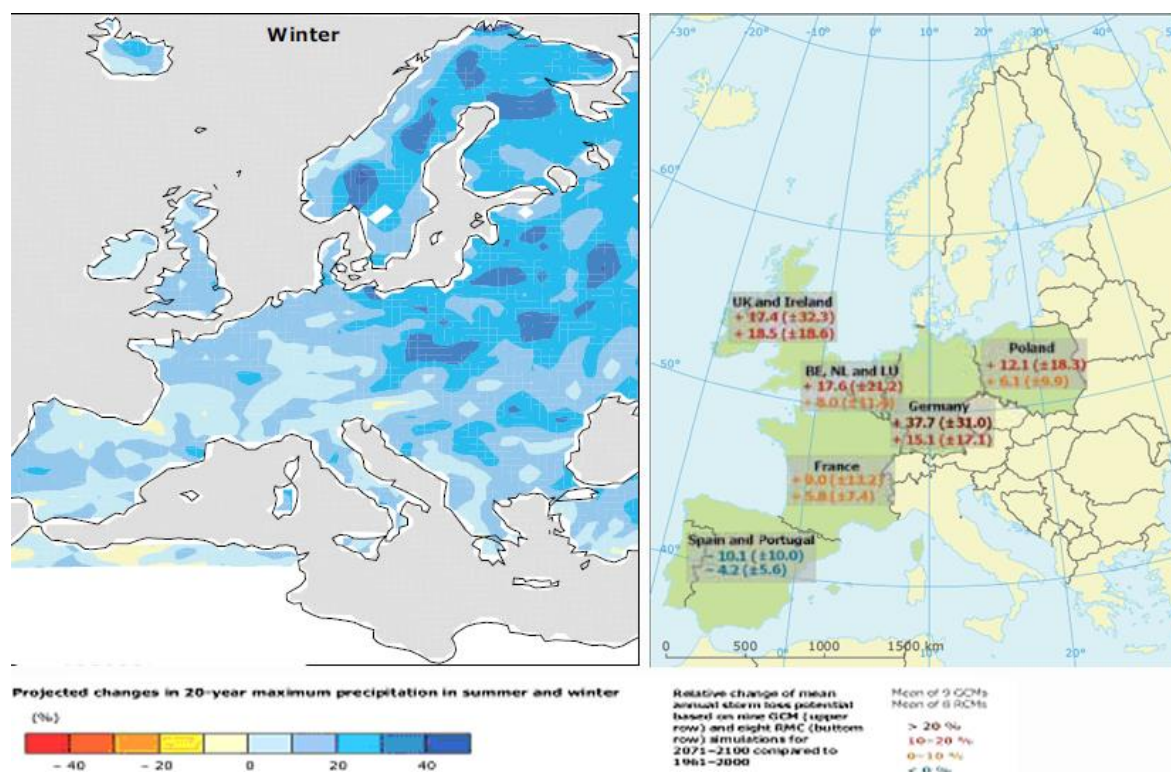


FIGURA 10. Projecção das alterações na precipitação máxima diária no Inverno, relativamente a 1961–1990 a 2071–2100 (esq.) e alteração relativa da perda do potencial médio anual das tempestades entre 1961–2000 e 2071–2100, para o cenário A1B (dir.). Fonte: EEA (2012a) e EEA (2012b).

Resumindo, as alterações climáticas vão implicar as seguintes alterações nos regimes de precipitação e de tempestades:

- Aumento generalizado dos fenómenos de precipitação intensa e muito intensa, sobretudo no Norte da Europa.
- Aumento significativo da precipitação média em determinadas regiões, como o Norte da Europa, e decréscimo acentuado em outras, como a região Mediterrânica.
- Deslocação dos fenómenos de tempestades, com um aumento significativo da amplitude da sobre-elevação em determinadas regiões, como o Norte da Europa e América do Norte, e decréscimo em outras, como a região Mediterrânica.
- Aumento da intensidade de furacões extra-tropicais no Atlântico Norte.

1.3. A subida do nível médio do mar

A subida do nível médio do mar constitui um dos fenómenos com maior potencial de ameaça para os deltas e estuários urbanizados. Devido à sua proximidade do nível da água e ao relevo aplanado, muitas frentes de água encontram-se fortemente ameaçadas, colocando em risco a sua manutenção no longo prazo. A sua subida aumenta exponencialmente a frequência a área afectada pelas inundações costeiras, nomeadamente nos locais sujeitos a eventos de forte sobreelevação (devido a tempestades ou furacões). Apesar de ser um fenómeno relativamente lento, a observação da sua aceleração nas últimas duas décadas, passando de 1,7mm/ano no século XX para 3.2 mm/ano, pode implicar um significativo aumento do risco de inundação de vastas áreas já no final do século, colocando em risco milhões de habitantes e a manutenção de grandes metrópoles. No entanto, a SNMM tem ainda importantes implicações globais na possibilidade de drenagem pluvial e fluvial das zonas costeiras, podendo a sua conjugação com o aumento da intensidade de precipitação antecipar os futuros impactos. Se grandes subidas do nível do mar colocam em risco as áreas costeiras pela sua frequente submersão, pequenas subidas são suficientes para aumentar significativamente as dificuldades de escoamento fluvial e pluvial, nomeadamente nas sensíveis frentes de água. Desta forma, a subida do nível do mar implicará também que as cidades costeiras repensem a drenagem urbana, uma vez que esta será progressivamente dificultada. Assim, torna-se essencial compreender a relação da SNMM com as alterações climáticas e a sua previsível evolução, de forma a poder compreender qual a dimensão da sua futura influência na inundação urbana das frentes de água.

O nível do mar variou com uma grande amplitude ao longo da história da Terra, estando este fenómeno associado aos períodos de aquecimento e de arrefecimento do planeta. O aumento e a diminuição das massas de gelo, durante os períodos glaciares e interglaciares, fizeram com que o nível do mar oscilasse periodicamente cerca de 100 metros nos últimos 800.000 anos. Actualmente, o clima encontra-se no final de um período interglaciar tendo o mar subido aproximadamente 120 metros desde a última glaciação, acerca de 21.000 anos, e estabilizado nos últimos 3.000 a 4.000 anos, não tendo variado mais do que 14 centímetros até ao início do século XIX (Lambeck, Anzidei et al. 2004). As observações efectuadas por marégrafos, e desde os anos 90 por satélite, permitiram observar que o nível mar não é uma entidade estável, tendo subido cerca de 21 centímetros entre 1880 e 2009, e de forma acelerada a partir dos anos 60 (Church e White 2011). Durante o século XX o nível do mar subiu a uma taxa de 1.7 ± 0.2 mm/ano, aumentando para 1.9 ± 0.2 mm/ano entre 1961 e 2009, com uma acentuada aceleração entre 1993 e 2012, para valores de 3.2 ± 0.4 mm/ano (Church et al. 2011; CU 2013).

O fenómeno foi reconhecido pelo IPCC desde o primeiro relatório, em 1990, sendo as causas atribuídas à expansão térmica dos oceanos e ao derretimento de gelo dos glaciares de montanha e dos mantos de gelo, consequência dos efeitos do aquecimento global produzido pelas emissões antropogénicas de GEE.

“Com base na observação da temperatura dos oceanos, a expansão térmica da água do mar, conforme aquece, contribuiu substancialmente para a subida do nível do mar nas últimas décadas. (...) É muito provável que a resposta ao forçamento radiativo de origem antropogénica tenha contribuído para a subida do nível do mar na última metade do século XX (...)” (IPCC 2007a, p.60).

A observação da expansão térmica registou um aumento da temperatura dos oceanos em cerca de 0,13 °C/década na sua camada superficial (0-700m) desde os anos 50. Os oceanos constituem o maior contentor de energia do sistema climático, calculando-se que absorvem cerca de 80 a 90% do total disponível, incluindo o aumento criado pelo forçamento radiativo antropogénico. A continuação das emissões antropogénicas implica que a sua expansão aumente, projectando-se uma contribuição entre 0.10 a 0.41 m até final do século XXI para os diversos cenários (IPCC 2007a). No entanto, a expansão térmica é apenas responsável por cerca de 30 a 40% da SNMM nas duas últimas décadas, estando a actual aceleração ligada ao rápido derretimento das massas de gelo, sendo os principais contribuintes os glaciares de montanha e os mantos de gelo da Antárctica e Gronelândia (Meyssignac e Cazenave 2012).

Nas últimas décadas registou-se o derretimento dos glaciares de montanha, tendo o fenómeno sido evidente a partir dos anos 90 através da observação de um recuo significativo em diversas regiões. Os glaciares de montanha são muito sensíveis ao aquecimento global, devido à proximidade da sua temperatura dos 0 °C, bastando pequenas variações para se iniciar o seu derretimento. Estima-se que nas últimas duas décadas a sua contribuição para a SNMM tenha sido de 30% do total, ou seja, cerca de 1.0 mm/ano (Meyssignac et al. 2012).

A contribuição dos mantos de gelo da Antárctica e Gronelândia para a SNMM tem sido observada desde a década de 90, mas as dificuldades de percepção do seu derretimento tem dificultado a compreensão da sua evolução no presente e no futuro. Os recentes esforços realizados pela comunidade científica permitiram compreender a extensão dos impactos e diminuir parcialmente as incertezas associadas às suas alterações, sendo actualmente inequívoca a perda de massa em ambos os pólos (Figura 11). Na sua globalidade, os mantos de gelo contribuíram com 0.59 ± 0.20 mm/ano para a SNMM entre 1992 e 2011, registando-se uma tendência de aceleração nos últimos anos, com taxas próximas de 1 mm/ano (Velicogna 2009; Jacob, Wahr et al. 2012; Shepherd, Ivins et al. 2012). Os mantos de gelo constituem o maior reservatório de água, podendo subir o nível do mar em cerca de 64 m no caso do seu total derretimento. No entanto, as analogias paleoclimáticas com o último período interglaciar permitem estimar que o equilíbrio para uma temperatura global superior em 3 a 5 °C implicaria uma subida entre 5.5 a 9 m (Rohling, Grant et al. 2008).

Os mantos de gelo contribuem para a SNMM através de dois processos. O primeiro consiste no derretimento do gelo à superfície durante os períodos quentes, sendo este compensado pela precipitação de neve nos períodos frios. Quando o derretimento é superior à precipitação, o manto de gelo perde massa e contribui para a SNMM. Este processo é ampliado pelo aquecimento global através do aumento da temperatura à superfície e pelo aumento do número

de dias de calor, sendo responsável por cerca de 50% do derretimento verificado na Gronelândia. O forte aumento da temperatura observada e projectada nas latitudes mais altas, nomeadamente no Ártico, implica que o fenómeno continue a acentuar-se no futuro, estimando-se que a temperatura limite da Gronelândia seja de 1,6 °C, valor a partir do qual ocorrerá sempre derretimento e a SNMM (Robinson, Calov et al. 2012). O segundo processo relaciona-se com o rápido recuo dos mantos de gelo marinhos e a consequente destabilização dos glaciares interiores, descarregando grandes quantidades de gelo para o mar. Os processos que regulam este fenómeno eram desconhecidos até recentemente, sendo que na actualidade compreende-se que estão fortemente relacionados com o aumento da temperatura dos oceanos e com incursão de águas relativamente quentes através da circulação oceânica. O presente aumento da temperatura dos oceanos representa uma forte ameaça para o rápido derretimento dos mantos de gelo marinhos, sendo aparentemente de menor gravidade na Gronelândia por as massas de gelo estarem maioritariamente assentes sobre a crosta terrestre. O fenómeno é mais problemático no Este da Antárctica, onde os mantos de gelo se situam maioritariamente sobre o mar. A contribuição da Antárctica para a presente SNMM era praticamente desconhecida no passado, sendo inclusivamente considerada como negativa no último relatório do IPCC (AR4). Os estudos recentes apontam para uma diminuição da massa de gelo na região Este e um aumento na restante parte do continente, sendo que na globalidade a perda de massa não é compensada pelos ganhos. O derretimento do Este da Antárctica implicaria um aumento de cerca de 4 m no nível do mar, prevendo-se o início de uma grande contribuição a partir do final do século, independentemente dos cenários, devido ao aquecimento já registado e às consequentes alterações na circulação oceânica (Figura 12) (Hellmer, Kauker et al. 2012).

A contribuição dos mantos de gelo para a SNMM não foi superior a 20% nas últimas duas décadas, tendo no entanto este valor subido para 30% nos últimos 10 anos. Devido à complexidade de modelação das dinâmicas de degelo, as projecções físicas são ainda consideradas como incertas, sendo as estimativas realizadas por analogias com o passado ou por extrapolação das tendências actuais. Os estudos apontam como possível um aumento de 0.31 a 1.17 m até ao final do século e, com maiores certezas, aumentos superiores nos séculos seguintes (Pfeffer, Harper et al. 2008; Kopp, Simons et al. 2009). Apesar das incertezas quanto à futura velocidade do derretimento, este é unanimemente considerado como irreversível, sendo necessário uma grande descida da temperatura para reverter o fenómeno.

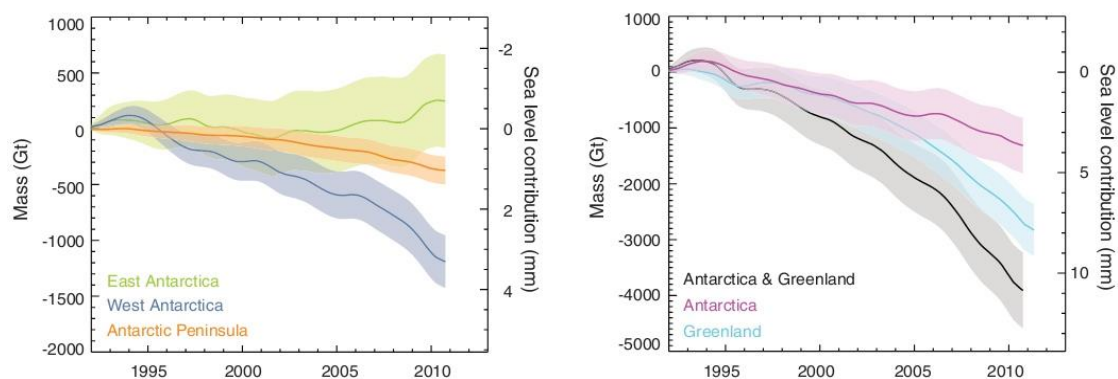


FIGURA 11. Variações de massa observadas nos mantos de gelo. Fonte: Shepherd et al. (2012).

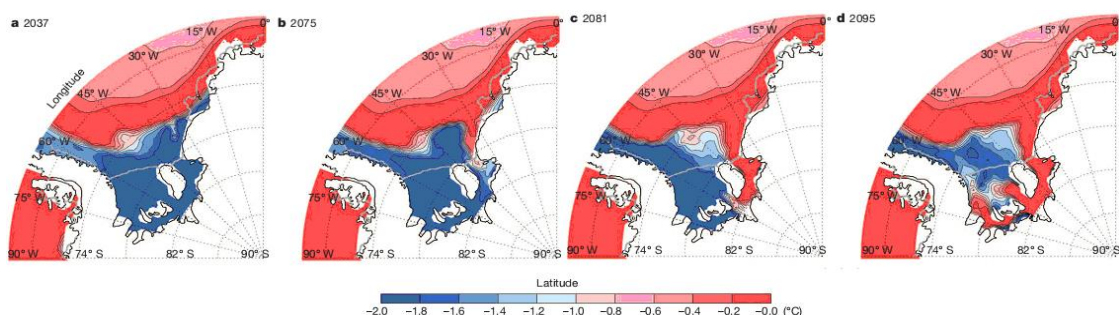


FIGURA 12. Previsão da circulação oceânica de águas relativamente quentes no Mar de Weddell (Este da Antártica). Fonte: Hellmer et al. (2012).

Para determinar a velocidade e amplitude da SNMM, foram aplicados modelos climáticos às suas diferentes componentes, de modo a responderem aos cenários de emissões e ao respectivo forçamento. No quarto relatório do IPCC as projecções estimaram um aumento do nível do mar entre 0.18 e 0.59 m para o final do século (Figura 5), e um valor adicional de -0.01 a 0.18 m caso se continuassem a verificar as tendências de aceleração das descargas nos mantos de gelo (IPCC 2007a). No entanto, o IPCC reconheceu no AR4 que as estimativas de SNMM não são exactas e que não podem ser consideradas como as melhores estimativas, sobretudo devido ao desconhecimento dos principais processos de descarga dos glaciares nos mantos de gelo, não excluindo, por essa razão, futuros cenários mais gravosos.

De modo a colmatar a presente dificuldade de modelação dos processos envolvidos na SNMM, o físico e oceanógrafo Stephan Rahmstorf estabeleceu uma relação estatística entre o aumento da temperatura e a SNMM, tendo como base as variações ocorridas no passado. Estas projecções são apelidadas de semi-empíricas e são parcialmente rejeitadas pelo IPCC devido à ausência de uma base física. No entanto, as projecções semi-empíricas têm demonstrado serem mais exactas nas previsões do que os modelos físicos apresentados pelo IPCC, de acordo com a evolução do NMM da última década, podendo-se considerar que as estimativas dos modelos físicos são baixas e notoriamente conservadoras, não acompanhando a realidade do fenómeno.

Os modelos semi-empíricos projectam uma SNMM bastante superior, entre 0.50 e 1.80 m para o final do século, situando-se as melhores estimativas entre 0.70 e 1.30 m (Rahmstorf 2007; Horton, Herweijer et al. 2008; Grinsted, Moore et al. 2009; Vermeer e Rahmstorf 2009; Jevrejeva, Moore et al. 2010).

Devido à actual controvérsia quanto à fiabilidade das diversas estimativas e à dificuldade de percepção dos futuros impactos, as regiões e países mais expostos à SNMM deram início à realização dos seus próprios estudos e projecções. De um modo geral, os estudos mais completos projectam os processos bem conhecidos através de modelos físicos e dos cenários de emissões, como a expansão termal e o derretimento dos glaciares, e contabilizam a contribuição dos mantos de gelo através de extrapolações das tendências actuais, tendo em consideração os processos actualmente conhecidos. As suas projecções apontam para uma SNMM entre 0.50 e 1.40 m, excluindo o caso britânico que adoptou as projecções do IPCC (ver Anexo 1 – Tabela 1). Os estudos ponderam ainda a possibilidade dos piores cenários, entre 1.70 e 2.50 m, com base nos máximos de SNMM registados no passado, embora a sua probabilidade de ocorrência neste século seja considerada muito baixa.

Uma vez que um intervalo entre 0.50 a 1.40 m pode ainda ser considerado como bastante grande, com implicações muito diferentes a nível de impactos e planeamento, a incerteza necessita de ser diminuída de modo a aumentar a previsibilidade dos futuros riscos. No entanto, a incerteza existente é inerente às projecções, uma vez que estas dependem das futuras emissões de GEE e das respostas dos mantos de gelo, podendo apenas ser diminuída através do constante acompanhamento do nível do mar, das tendências das emissões e das respostas dos mantos de gelo às alterações climáticas, realizando actualizações periódicas das projecções.

Nesta óptica, a presente evolução da SNMM e os dados mais recentes das emissões, que se aproximam dos piores cenários (A1FI e RCP8.5), apontam para uma grande probabilidade de se confirmarem as estimativas mais altas, correspondentes a um aumento entre 0.63 e 1.40 m (ver Anexo 1 – Tabela 1). A aplicação dos modelos físicos à SNMM já ocorrida, e não ao ano 2000 como nas projecções do AR4, implica um aumento do limite inferior para um mínimo de 0.46 m, (Rahmstorf, Foster et al. 2012), consistente com os resultados dos estudos que optam por modelar a contribuição dos mantos de gelo segundo as suas tendências actuais.

Resumindo, pode-se considerar que o presente conhecimento científico indica com bastante robustez as seguintes conclusões:

- A aceleração da SNMM será sentida com alguma severidade já no final do século XXI.
- É praticamente inevitável uma SNMM de 0.50 m até ao final do século, sendo que as melhores estimativas apontam para uma subida entre 0.75 e 0.85 m, não devendo ultrapassar os 1.40 m.

- O fenómeno é irreversível devido à contínua expansão térmica e à difícil reversão do derretimento dos mantos de gelo.
- A SNMM deverá continuar nos séculos seguintes, com maior severidade, dependendo a amplitude dos futuros impactos do nível de emissões e do período de início da mitigação.

No entanto, o cálculo da SNMM constitui um valor global da subida média do nível do mar, sendo esta sentida de forma diferente em cada região ou local. A SNMM é distribuída regionalmente, com variações de -10 a 10 mm/ano devido a diferenças de temperatura das águas do oceano, consequência da circulação oceânica e dos regimes de ventos (Figura 13) (Katsman, Sterl et al. 2011). O derretimento das massas de gelo também influencia a distribuição da subida do nível do mar devido a fenómenos de atracção gravítica, sendo a subida superior em regiões afastadas do local do derretimento. Actualmente, a principal causa da distribuição regional deve-se às diferenças de temperatura do oceano, prevendo-se que o futuro derretimento das massas de gelo altere os actuais padrões (Meyssignac et al. 2012; NRC 2012).

A percepção do nível do mar é ainda influenciada por factores locais, não climáticos, devido aos movimentos verticais das regiões costeiras. Os movimentos podem ser naturais, de origem geológica, ou induzidos pela acção humana (Nicholls, Hanson et al. 2011). Os principais processos geológicos envolvidos devem-se aos movimentos tectónicos, ao ajustamento isostático pós-glacial (GIA) e à compactação ou consolidação de sedimentos, podendo ser positivos ou negativos e lentos ou abruptos. A influência humana é geralmente negativa, e relaciona-se com a diminuição da acreção dos sedimentos costeiros, por alteração das correntes e pelo seu aprisionamento em barragens. Nos deltas e estuários o fenómeno é particularmente evidente, sendo ainda amplificado pela transformação do solo em uso agrícola ou urbano, cuja drenagem, impermeabilização ou extracção de recursos (água, gás ou petróleo) origina uma progressiva compactação. Os seus efeitos podem superar largamente a SNMM, atingindo médias superiores a 10 mm/ano em diversos deltas e estuários, aumentando exponencialmente os seus diversos riscos de inundação (Syvitski, Kettner et al. 2009).

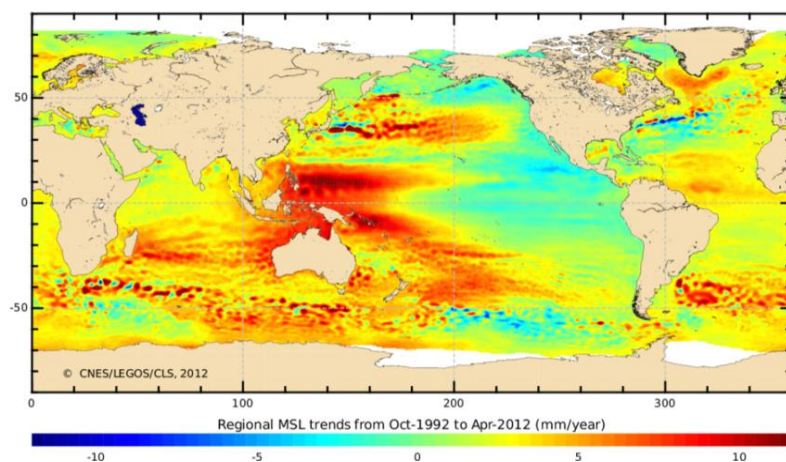


FIGURA 13. Distribuição regional da subida do nível do mar medida por satélite entre Outubro de 1992 e Abril de 2012. A região do Indo-Pacífico é a mais afectada. Fonte: AVISO (2012).

Em Portugal, o nível do mar tem acompanhado de forma muito próxima as variações globais, com uma subida de 1.3 mm/ano em Cascais e 1.5 mm/ano em Lagos durante o século XX, e uma taxa de 3.6 mm/ano em Cascais desde 2000 (Marcos e Tsimplis 2008; Antunes 2012b). A ausência de importantes movimentos verticais ou de fortes alterações na circulação oceânica, não tem alterado significativamente a percepção do fenómeno, devendo os valores para Portugal manterem-se próximos da evolução global no futuro. Para o caso de estudo de Lisboa apresentam-se valores mais detalhados das observações e projecções no anexo 2.

CAPÍTULO II

O risco de inundação nas frentes de água de deltas e estuários urbanizados no contexto de alterações climáticas. Estratégias e medidas de adaptação

Compreendidas as causas e a presente e futura evolução dos factores que influenciam os fenómenos de inundação nas cidades de deltas e estuários urbanizados, torna-se necessário entender como estes se reflectem na particularidade destes territórios. As cidades de deltas e estuários caracterizam-se pela sua exposição à acção fluvial, marítima e pluvial. A conjugação destes diversos processos hidrológicos no contexto das alterações climáticas tem importantes implicações no risco de inundação destas cidades e em particular nas suas frentes de água. No enquadramento da importância que as inundações fluviais e costeiras constituem para a futura manutenção destes territórios, a sensibilidade da drenagem urbana nas frentes de água pode constituir um problema recorrente e antecipado dos previsíveis fenómenos de inundação. A sua relevância prende-se com o facto de o escoamento urbano convergir na sua totalidade para estas áreas que, de um modo geral, já apresentam um elevado risco de acumulação e estagnação de água. Num contexto em que as precipitações intensas e as inundações pluviais são já uma realidade presente e com forte tendência de agravamento, as dificuldades de drenagem das frentes de água tenderão a aumentar devido ao subdimensionamento da drenagem e à progressiva obstrução dos seus pontos de descarga. Desta forma, independentemente da possibilidade da ocorrência de inundações fluviais ou costeiras, as frentes de água terão de se adaptar às novas dinâmicas de escoamento na perspectiva de evitar um forte aumento da frequência e expansão das inundações pluviais, cujas consequências podem ser aparentemente menores, mas quando recorrentes podem promover uma rápida degradação e abandono do meio urbano.

A inviabilidade prática da reconstrução integral dos sistemas de drenagem em cidades consolidadas implica que estas incorporem estratégias de adaptação inovadoras, em que a gestão das águas pluviais no meio urbano seja realizada de forma relativamente independente dos sistemas de drenagem artificial. Nesta óptica, o desenho e planeamento urbano podem

integrar diversos processos hidrológicos, desempenhando funções semelhantes às da infraestrutura de drenagem, e minimizando os efeitos das inundações urbanas nas frentes de água. O presente capítulo enquadra a importância do risco de inundação urbana, assim como algumas das estratégias e medidas de adaptação existentes.

2.1. O risco de inundação nas frentes de água de deltas e estuários em cenários de alterações climáticas

As frentes de água das cidades de deltas e estuários são particularmente sensíveis à inundação urbana. Com um relevo geralmente aplanado, original ou resultante de aterros realizados pelo homem, a sua capacidade de escoamento é reduzida, dando origem a frequentes inundações quando se registam precipitações mais intensas. Por outro lado, a sua localização a cotas altimétricas próximas do nível do mar dificultam o escoamento costeiro ou para uma linha de água na coincidência com maré-alta ou tempestades, aumentando a probabilidade de inundação nos pontos baixos das frentes de água (Figura 14). Desta forma, as alterações nos extremos de precipitação e na subida do nível do mar podem implicar um importante aumento do risco de inundação urbana existente, nomeadamente nos pontos baixos de descarga, ou seja, as frentes de água.

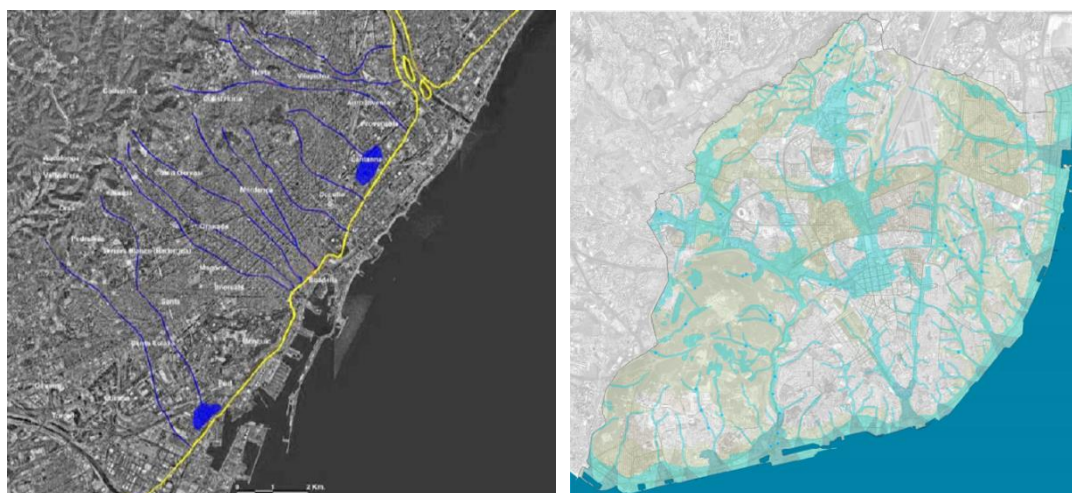


FIGURA 14. Reconstrução da estrutura hidrográfica de Barcelona e da sua linha de costa, e sistema húmido e de transição fluvial estuarino em Lisboa. Fonte: Martí (1997), in Silva (2011) e CML (2012).

O aumento da frequência e/ou intensidade dos extremos de precipitação implica um progressivo e generalizado subdimensionamento dos sistemas de drenagem. Desenhados para lidar com um determinado volume de água, o aumento da precipitação pode levar ao seu transbordo, dando origem ao escoamento superficial e à deslocação da água dos pontos altos para os baixos. Sendo o solo do meio urbano geralmente muito impermeabilizado, a ocorrência

de inundações depende maioritariamente da capacidade de acomodação dos sistemas de drenagem, uma vez que não existem sistemas alternativos para absorver os excessos. No entanto, as cidades costeiras de deltas e estuários dependem ainda da possibilidade de escoamento para um corpo de água (rio, mar ou estuário). Devido à subida do nível do mar, ao possível aumento da frequência e intensidade de tempestades em alguns locais ou ao aumento das descargas fluviais, a obstrução da drenagem será cada vez maior no futuro, diminuindo a sua eficiência (Figura 15). O problema é ainda exacerbado nos deltas que sofrem de elevada subsidência, ou seja, onde ocorre a compactação do solo e um abaixamento das cotas altimétricas, podendo o fenómeno superar largamente a actual subida do nível do mar.

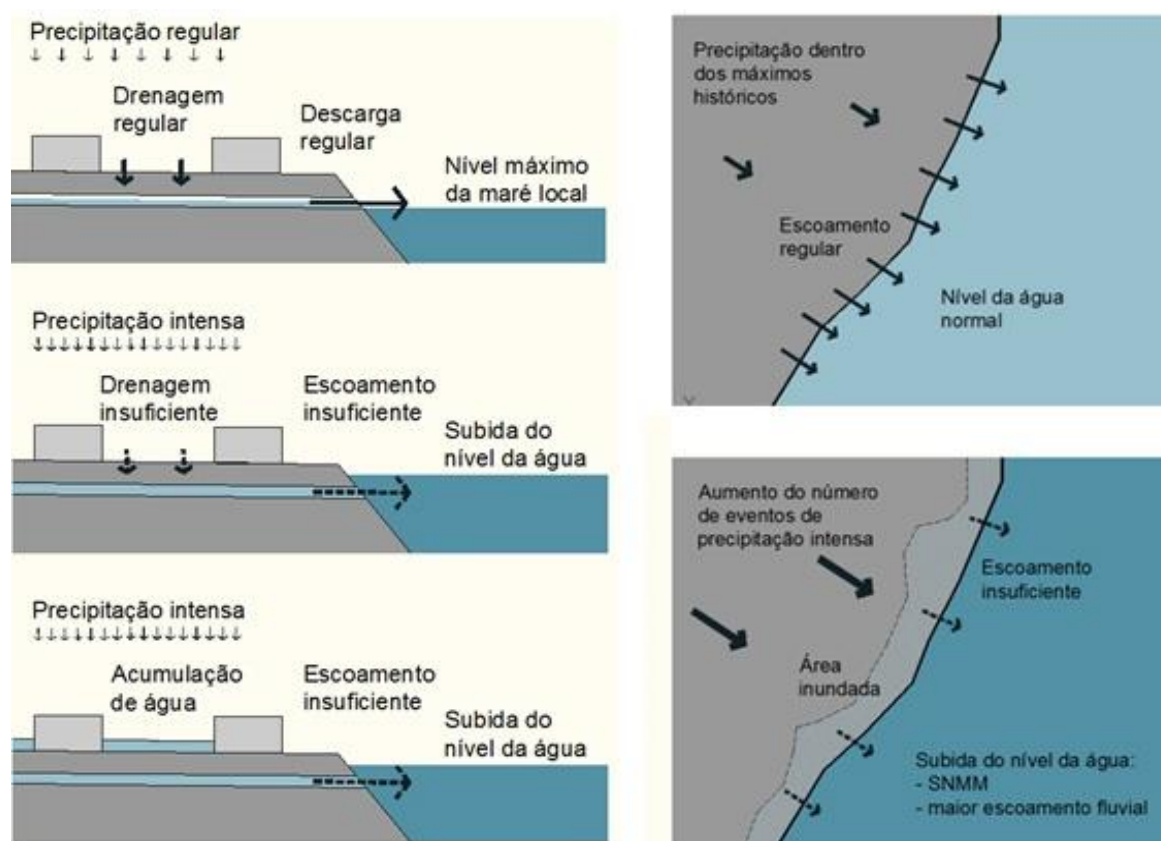


FIGURA 15. Esquema da relação entre a precipitação, a subida do nível da água e o escoamento costeiro, na origem de inundações urbanas nas frentes de água em cenários de alterações climáticas. Fonte: Autor.

Uma vez que o aumento dos fenómenos de precipitação extrema são já uma realidade presente em diversos locais, o risco de inundação urbana pode implicar o aumento dos impactos das frentes de água de forma antecipada à inundação costeira e fluvial nos deltas e estuários. Se o risco de inundação costeira depende de grandes subidas do nível do mar, o risco de inundação urbana pode aumentar de forma significativa para pequenas subidas, aumentando a frequência das inundações para precipitações cada vez menores devido à perda de eficiência do

escoamento costeiro. Para compreender o significado do risco de inundação urbana, as cidades necessitam de avaliar as projecções do nível do mar e das alterações de precipitação intensa, e aferir os seus impactos de forma conjunta, na sua interacção com os sistemas de drenagem e com o escoamento superficial urbano. Algumas cidades iniciaram este tipo de estudos de modo a compreender quais os possíveis impactos e a sua evolução no tempo, permitindo determinar o período a partir do qual é necessário tomar medidas de adaptação. A análise do problema em Copenhaga, fustigada em 2007 e 2011 por eventos extremos de precipitação, permite compreender que o risco de inundação urbana actual é elevado e só será superado pela inundação costeira em 2060 para um SNMM de 1 m (Figura 16). O risco de inundação urbana sobe progressivamente ao longo do tempo, resultado da SNMM e do aumento da intensidade de precipitação extrema.

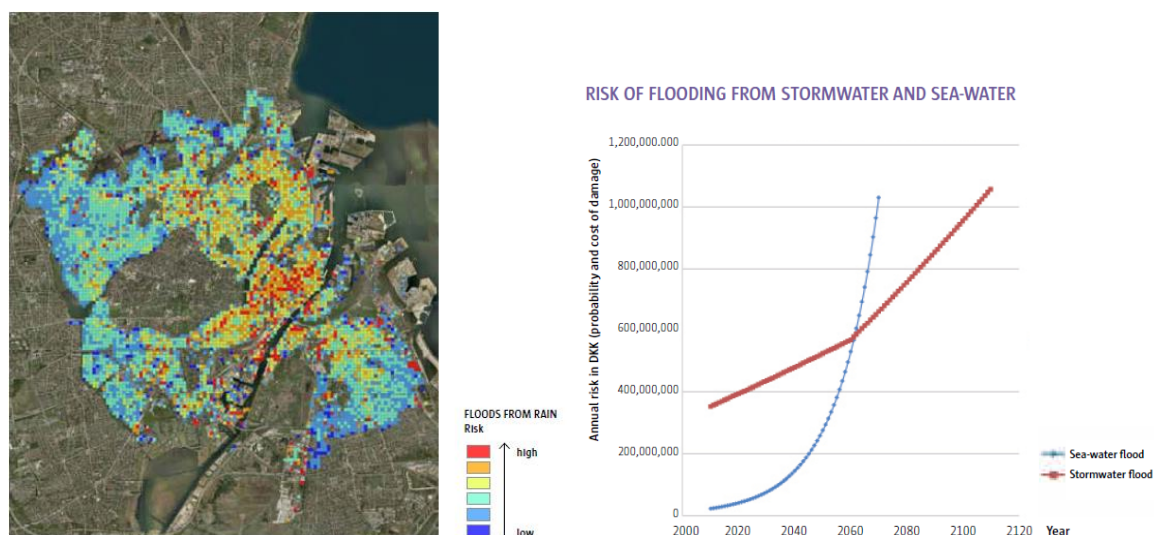


FIGURA 16. Altura de água de uma inundação urbana em Copenhaga para um evento de precipitação extrema (as zonas baixas e de frente de água são as mais afectadas) (esq.) e estimativa de impactos monetários ao longo do tempo e em função das alterações do nível do mar e da precipitação para o risco de inundação costeira (azul) e urbana (vermelho). Fonte: City of Copenhagen (2011).

Desta forma, a gestão do escoamento pluvial pode constituir uma prioridade nas estratégias de adaptação à inundação em alterações climáticas, embora a sua urgência dependa da determinação de cada contexto. O problema é particularmente grave para as frentes de água, por onde todo o escoamento das cidades é realizado. Se estas se podem proteger para pequenas subidas do nível do mar, pelo comum aumento das defesas costeiras, o escoamento das águas pluviais continuará a agravar-se, obrigando a um repensar da gestão da drenagem urbana (Figura 17).

Os impactos das inundações urbanas nas frentes de água não implicam apenas danos locais, estendendo-se a toda a cidade pela perturbação da mobilidade em geral e do funcionamento das diversas redes de serviços, como a electricidade, o abastecimento de água e gás, entre outras. O próprio funcionamento do sistema de drenagem pode ficar em risco, uma vez que o impedimento de escoamento nos pontos baixos tenderá a alastrar-se para cotas cada vez mais altas, afectando áreas cada vez mais interiores. Assim, o problema das inundações urbanas não deve ser olhado apenas localmente, dizendo respeito à manutenção de grandes áreas e, eventualmente, a cidades inteiras.

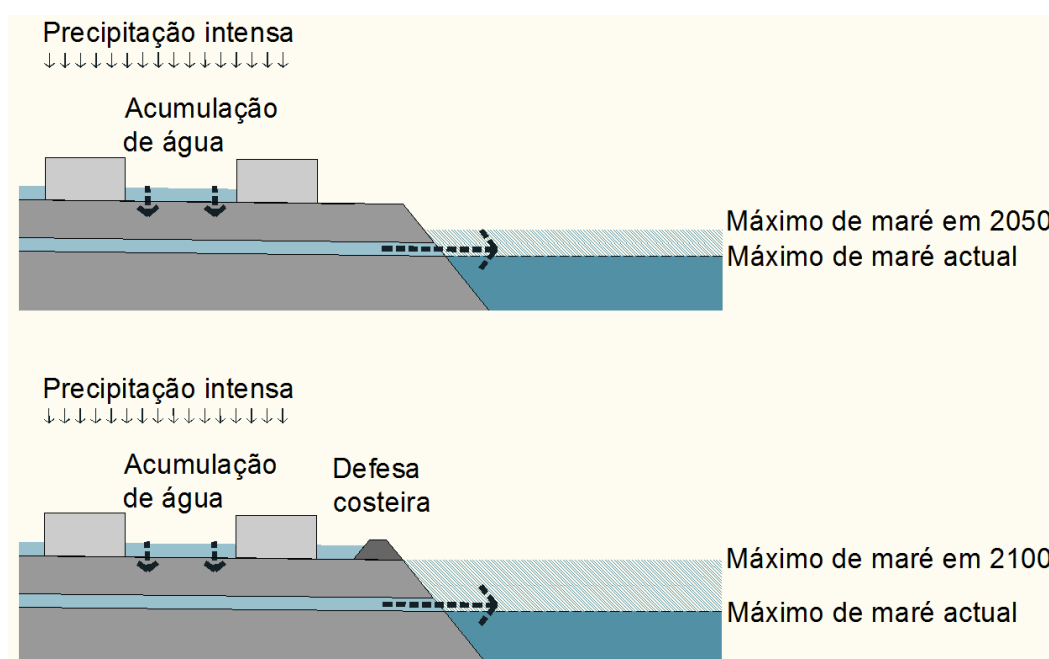


FIGURA 17. Subida do nível do mar e o risco de inundação costeira e urbana. O problema das inundações urbanas das frentes de água mantém-se apesar da protecção costeira. Fonte: Autor.

2.2. Estratégias de adaptação ao risco de inundação urbana em frentes de água de deltas e estuários

Para minimizar os efeitos mais negativos das inundações urbanas no contexto das alterações climáticas, muitas cidades costeiras, de deltas e estuários, iniciaram a adopção de estratégias de adaptação. A sua definição depende do estabelecimento prioritário dos vários cenários de alterações climáticas, nomeadamente da precipitação e da subida do nível do mar, e do estudo e percepção dos possíveis impactos e vulnerabilidades do meio urbano (população, edifícios, infraestruturas, etc.) para os diversos horizontes temporais. Mesmo quando os impactos estão já presentes de forma visível e frequente, o conhecimento da sua possível evolução fornece

importantes informações quanto à dimensão futura do problema, permitindo que as estratégias equacionem respostas para além do curto prazo. A definição de estratégias de adaptação às inundações urbanas dependem da compreensão dos impactos no território para os diversos cenários e horizontes temporais, considerando a incerteza existente, e pelo estabelecimento dos momentos a partir dos quais as respostas devem ser implementadas de modo a diminuir o problema.

Após a compreensão dos impactos, as estratégias de adaptação têm de equacionar quais são as respostas possíveis em cada contexto e como é que estas podem ser implementadas. Um dos elementos comuns aos diversos planos de adaptação consiste na percepção da incapacidade ou inadequação de reconstrução dos sistemas de drenagem artificial para fazer face à dimensão e velocidade do problema. A dificuldade da resolução das inundações urbanas pelo redimensionamento dos sistemas de drenagem em alterações climáticas prende-se a diversas causas. Em primeiro lugar, a reconstrução das infraestruturas implicaria uma renovação extensiva, resultando num elevado custo financeiro, não sendo este suportável pela maioria das cidades. De um modo geral, as infraestruturas de drenagem são desenhadas para horizontes temporais a 50-200 anos, período a partir do qual se considera como economicamente e financeiramente sustentável o seu investimento (Gersonius, Ashley et al. 2013). Uma vez que grande parte da expansão urbana é bastante recente, a reconstrução das infra-estruturas implicaria a perda do investimento já realizado e um grande aumento dos seus custos actuais. Em segundo lugar, a sua reconstrução é tecnicamente difícil em cidades consolidadas, podendo demorar décadas até à sua finalização, ou seja, a sua conclusão poderia apenas estar terminada quando muitos dos efeitos extremos de precipitação já teriam ocorrido. O problema é ainda acrescido pela presente incerteza da evolução da intensidade de precipitação e do nível do mar nas próximas décadas, cujo conhecimento é um dos elementos mais importantes para o seu correcto dimensionamento. Como o investimento nos sistemas de drenagem é feito para grande horizontes temporais, a total dependência no seu correcto funcionamento pode constituir uma inadaptação no médio e longo prazo.

Devido à sua dificuldade de reformulação e possível inadaptação para cenários futuros, cidades como Roterdão, Nova Iorque ou Copenhaga optaram por não depender unicamente dos sistemas de drenagem artificial para evitar os piores efeitos das inundações urbanas. Esta opção deve-se à compreensão da falta de flexibilidade que os sistemas de drenagem possuem para um clima dinâmico, sendo necessário alterações regulares para a sua adequação aos futuros fenómenos. Desta forma, as estratégias de adaptação apostam num desenvolvimento urbano que permita, sempre que possível, acompanhar de forma dinâmica os fenómenos das alterações climáticas ou outros processos naturais, em equilíbrio com os processos ecológicos:

“Where possible we shall move along with the natural developments resulting from climate change and other natural processes. We shall build and develop the country as far as possible in harmony with ecological processes.” Deltacommissie (2008).

Transpondo para os sistemas de drenagem e a gestão das inundações urbanas, estes princípios representam uma importante mudança de atitude, de acordo com tendências já existentes e agora reforçadas pelas alterações climáticas. Uma vez que os sistemas de drenagem artificial apenas lidam com o problema do escoamento nas suas consequências, sendo necessário constantes aumentos para fazer face à expansão urbana e a maiores quantidades de água, parte das estratégias aposta na diminuição do volume de água na origem, através de sistemas de infiltração ou retenção, compatibilizando a ocupação urbana com o escoamento originado. Desta forma, a drenagem urbana não é apenas olhada na perspectiva infraestrutural e final, mas sim através de todo o seu ciclo, ligando-a ao planeamento do espaço e a todos os processos que aumentam a dependência na infraestrutura. Esta mudança de atitude é particularmente importante num clima incerto, em que a diminuição na dependência da infraestrutura representa uma importante vantagem no médio e longo prazo, diminuindo a futura necessidade do seu constante reajustamento.

Como exemplo da viabilidade e vantagens da adopção de uma estratégia que combina o potencial hidrológico da infraestrutura verde com a cinzenta, o plano de Nova Iorque prevê diminuir o número de transbordos do sistema de drenagem em cerca de 40%, calculando uma poupança de 1.5 biliões de dólares em relação a uma estratégia baseada unicamente na infraestrutura de drenagem artificial (Figura 18). De igual forma, a cidade de Copenhaga aposta na reconversão pontual do sistema de drenagem artificial e na atenuação dos futuros caudais através de sistemas de drenagem urbana sustentáveis (SUDS), diminuindo em cerca de 30% a sua afluência para os sistemas centralizados, calculando uma poupança de cerca de 50% em relação a medidas cinzentas e uma maior eficiência final (City of Copenhagen 2011).

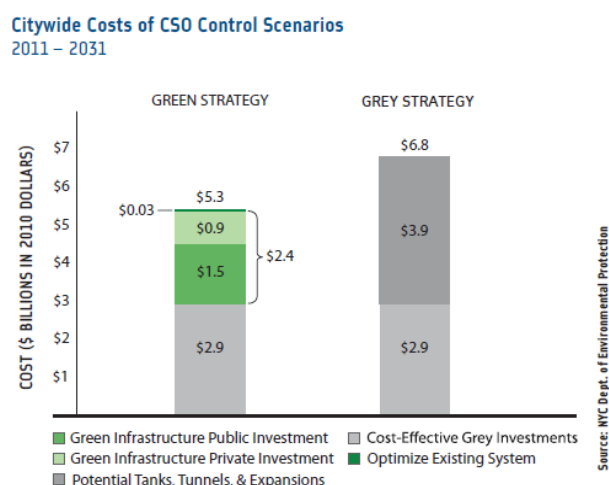


FIGURA 18. Custo das medidas de controlo de transbordos do sistema de drenagem pluvial para a cidade de Nova Iorque entre 2011 e 2031. Fonte: plaNYC (2011).

Mas as vantagens na aposta na infraestrutura verde não se resumem apenas ao problema das inundações urbanas, apresentando outros efeitos relevantes no contexto das alterações

climáticas e das cidades. Uma vez que as ilhas de calor urbano, a poluição do ar e da água ou os períodos de seca alargada serão problemas cada vez mais graves e urgentes, a aposta na infraestrutura verde permite atenuar estes efeitos pelo aumento das áreas verdes e permeáveis ou pela reutilização da água nos sistemas desconectados. Ao contrário dos sistemas centralizados que fecham o ciclo da água numa estrutura independente, os sistemas descentralizados permitem reintroduzir importantes aspectos do ciclo hidrológico nas cidades e melhorar diversos aspectos do ambiente urbano, tanto através da melhoria da qualidade física do ar e da água, como pelo aspecto estético ou da reconstituição da biodiversidade urbana.

Para além da aposta comum no potencial da infraestrutura verde ou dos SUDS para diminuir a afluência do escoamento para os sistemas de drenagem, as estratégias de adaptação trabalham o problema hidrológico de uma forma diversa e com importantes consequências ao nível do planeamento urbano. Em vez de a gestão do escoamento ficar entregue a índices ou a eventuais melhoramentos da rede de drenagem, o problema é colocado de forma inversa e mais directa, através da determinação dos potenciais impactos e dos volumes de água em excesso (Figura 19). Desta forma, cabe ao conjunto dos sistemas urbanos encontrar soluções viáveis que permitam acomodar os caudais necessários, independentemente da sua natureza. A título exemplificativo, a cidade de Roterdão estima que seja necessário acomodar no espaço urbano cerca de 600.000 m³ de água até 2015 e 800.000 m³ até 2050 para satisfazer os níveis de risco desejáveis, de acordo com as alterações de precipitação projectadas (Municipality of Rotterdam 2007).



FIGURA 19. Projeção do escoamento superficial para uma precipitação de 54 mm para a área urbana de Roterdão. As áreas impermeáveis e as frentes de água correspondem às zonas mais afectadas. Fonte: Ven, Nieuwkerk et al. (2011).

A transposição directa do escoamento hidrológico para o meio urbano obriga assim a equacionar as vantagens e desvantagens de cada tipo de soluções, as possibilidades técnicas e a sua facilidade de integração. Dada a dificuldade da reformulação dos sistemas de drenagem, o

urbanismo, o planeamento e o desenho urbano podem recuperar parte da operacionalidade que estava depositada nas infra-estruturas. Nesta perspectiva, a leitura da paisagem urbana sobre um olhar hidrológico interdisciplinar, que analise as diferentes relações do escoamento da água na paisagem urbana, permite contribuir para a síntese do problema e o encontro de soluções viáveis, complementando ou independentizando-se parcialmente dos sistemas de drenagem centralizados. Estando o escoamento hidrológico profundamente ligado aos sistemas naturais, ao papel da infraestrutura de drenagem e à ocupação superficial, ou seja, às diferentes componentes que modelam o escoamento hidrológico da paisagem urbana (Figura 20), a sua leitura conjunta permite compreender as relações existentes entre os diferentes componentes da paisagem e modelar os processos hidrológicos de drenagem para além dos sistemas artificiais. A título exemplificativo, é facilmente compreensível que o excesso de impermeabilização do solo, pela edificação e pavimentação, não permite a infiltração e aumenta a velocidade do escoamento, sobrecarregando os sistemas de drenagem, ou que as linhas de água podem armazenar ou escoar com maior flexibilidade que uma tubagem. Desta forma, uma leitura mais transversal da drenagem, permite estabelecer diferentes relações hidrológicas, hibridizando os processos naturais, a infraestrutura e a ocupação urbana, na óptica de encontrar as estratégias e medidas mais adequadas a cada contexto. O planeamento e desenho urbano constituem assim uma importante ferramenta na modelação do escoamento pluvial, podendo integrar diversas medidas que potenciem o armazenamento ou a detenção do escoamento. Entre soluções inovadoras ou já conhecidas, o desenho urbano pode incluir praças e edifícios que armazenam água; pavimentos e espaços verdes que funcionam como reservatórios e pontos de infiltração; parques e jardins que inundam; linhas de água que funcionam simultaneamente como espaço público, condutas e reservas biológicas; entre outras soluções. Assim, o tecido edificado e os espaços públicos e/ou verdes podem ser entendidos como autênticas infraestruturas de drenagem, com um desempenho tão quantificável como qualquer reservatório ou tubagem, funcionando de forma igual ou até mais eficiente.

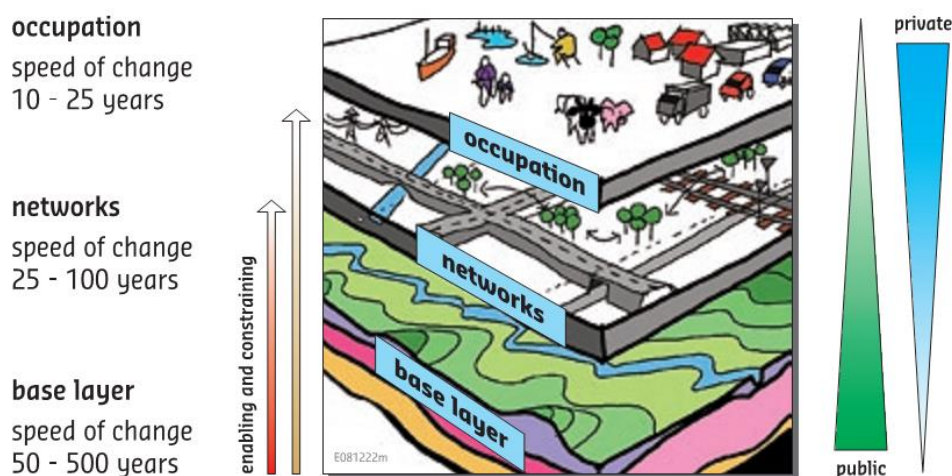


FIGURA 20. Modelo de layers para planeamento da paisagem urbana. Fonte: Most, Marchand et al. (2009)

No entanto, cada cidade necessita de encontrar quais as medidas que melhor se adaptam ao seu contexto. Enquanto num meio urbano muito consolidado um depósito de águas pluviais pode ser a única solução viável e robusta, num meio menos denso as soluções podem passar pela por diversas medidas de descentralização da drenagem. A forma como a estratégia é delineada depende ainda do nível de risco de cada caso e da disponibilidade política e económica das entidades públicas e privadas para resolver o problema. Assim, as soluções podem ser tão variadas como a rede de depósitos de águas pluviais em Barcelona, a abordagem da região ao edifício de Copenhaga, que prevê bacias de retenção, reabertura de canais, desvio de águas e a desconexão do escoamento para os sistemas centralizados (City of Copenhagen 2011), ou a acomodação do escoamento no espaço público e nos edifícios adoptada por Roterdão (Figura 21). O que constitui uma novidade em todos os planos é o reconhecimento da incapacidade dos sistemas de drenagem resolverem o problema no médio e longo prazo, como até agora tinha acontecido, tendo o meio urbano de reintegrar no seu planeamento o escoamento hidrológico.

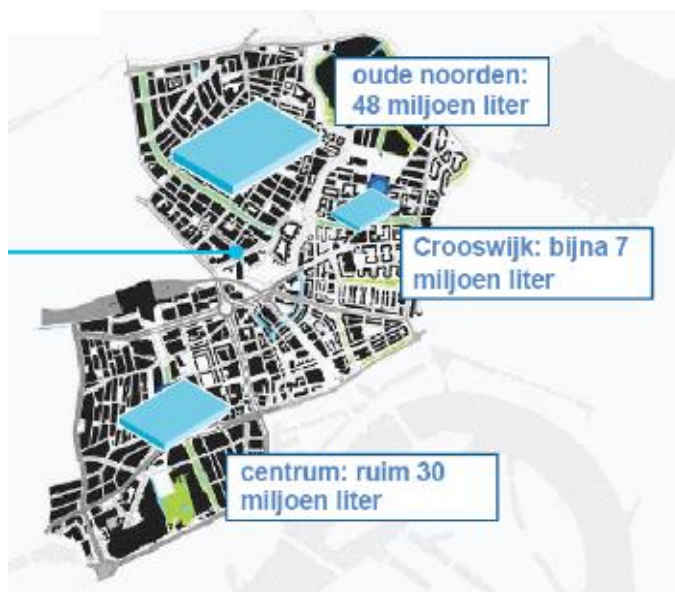


FIGURA 21. Plano do volume de água a acomodar por quarteirão na cidade de Roterdão. Fonte: Boer (2012).

Mas a adopção de uma estratégia de adaptação à inundação não implica necessariamente a inexistência de riscos e inundações. Uma vez que nem todas as cidades podem ter a possibilidade de diminuir os eventos de inundação no curto prazo e de forma a acompanhar a evolução dos impactos, estando dependentes do contexto social, económico, tecnológico e urbano existente (Bruijn, Klijn et al. 2009), a preparação do meio urbano para conviver com os eventos de inundação pode fazer a diferença entre a sua manutenção e o abandono. Através do estudo dos impactos e da exposição ao risco, o planeamento urbano pode implementar medidas de resiliência, que contribuam para a mitigação dos danos e para o agilizar da recuperação. Para além de diminuir os impactos inevitáveis no presente, a resiliência tem ainda um importante

papel na definição de futuras zonas de risco, evitando a construção e o desenvolvimento de edificações e infraestruturas impreparadas que ampliem os impactos.

Transpondo para as frentes de água dos deltas e estuários urbanizados, as estratégias devem consistir num balanço entre as possibilidades de aumentar a retenção de água a montante, de modo a atenuar os picos de inundação e diminuir a sobrecarga dos sistemas de drenagem; melhorar o escoamento das águas pluviais nas zonas de descarga, diminuindo a progressiva obstrução da subida do nível do mar; e incrementar a resiliência nas frentes de água, acompanhando de forma coerente a evolução das projecções climáticas e a transposição dos seus impactos para o território. Independentemente da estratégia de adaptação se basear em medidas mais centralizadas ou dispersas, mais estruturais ou não estruturais, de resiliência ou de controlo da inundação, no seu conjunto devem conseguir formar uma estratégia clara, que responda ao problema das inundações no presente e na sua evolução ao longo do tempo (Figura 22 e 23). Da mesma forma, embora cientes da abertura e incerteza necessária, a transposição das estratégias para o meio urbano tem de corresponder a objectivos concretos, sejam estes de planeamento a longo prazo ou baseados em intervenções pontuais.

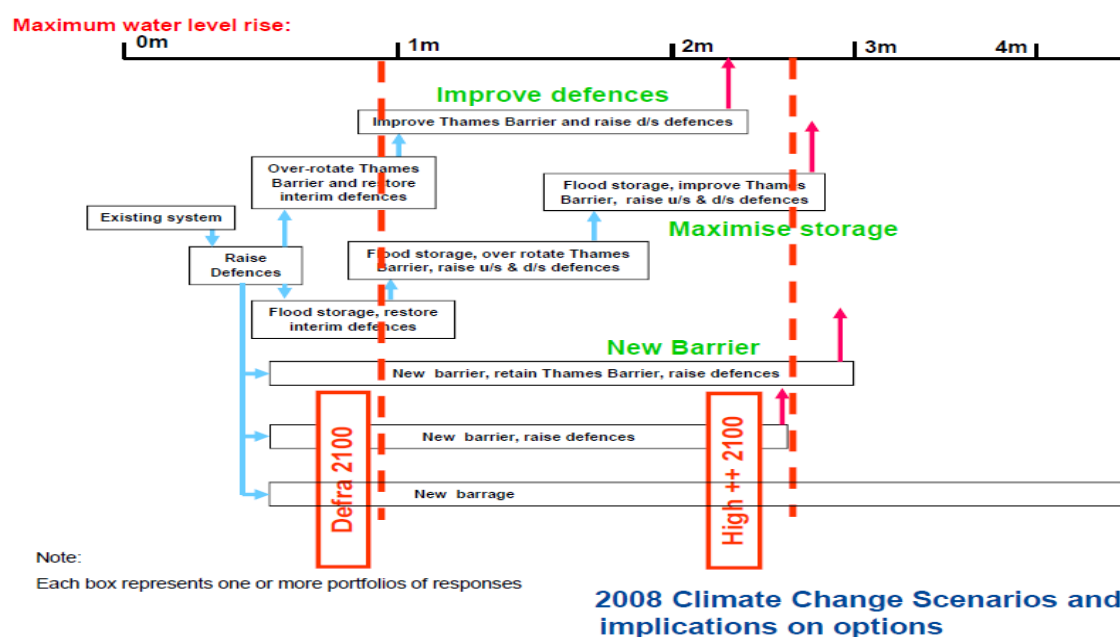


FIGURA 22. Exemplo de adaptação flexível à SNMM para o Estuário do Tamisa. As respostas vão sendo implementadas conforme a SNMM vai atingindo pontos críticos. Fonte: Reeder (2011)

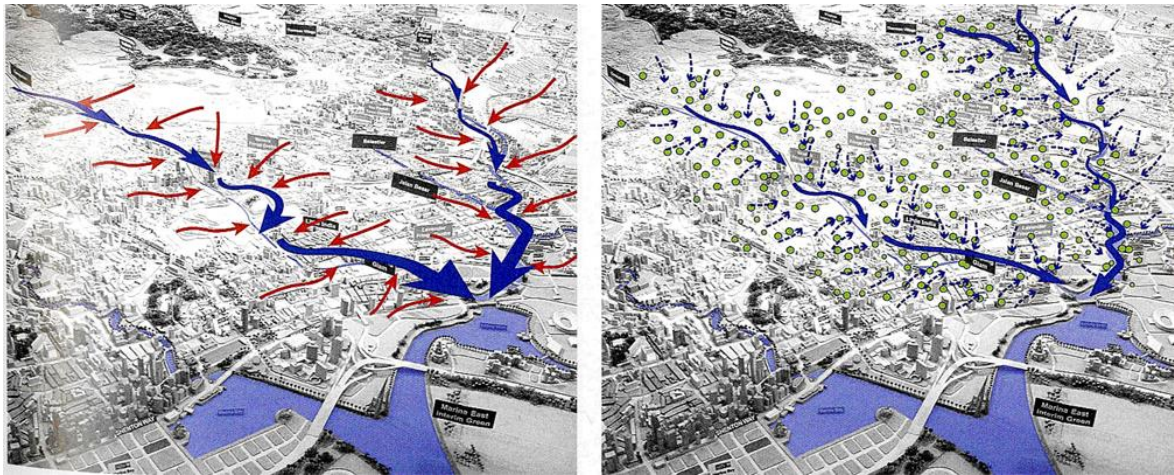


FIGURA 23. Problemas de escoamento superficial em Singapura (esq.) e estratégia descentralizada de retenção para minimização dos picos de precipitação. Fonte: Dreiseitl (2007).

A definição das estratégias de adaptação tem ainda de ter em conta a forma como estas podem ser aplicadas nos tempos urbanos. Não sendo possível a adaptação do meio urbano no curto prazo, mesmo quando existe um claro suporte político e social, a sua integração tem de ser enquadrada na diversidade de agendas existentes, tais como as de expansão e renovação, ou ainda na interligação com outras estratégias referentes aos impactos das alterações climáticas, tais como as ilhas de calor, a falta de água ou da SNMM. Desta forma, cada projecto deve ter em conta localmente o contexto do problema na sua globalidade e contribuir para a atenuação dos impactos nos diversos horizontes temporais, procurando integrar na sua intervenção respostas concretas (Costa 2011). A percepção dos impactos no tempo e a ligação de um contexto local a um problema com fronteiras nem sempre evidentes constitui um importante dado no futuro planeamento urbano. Neste aspecto, pode-se apontar a reconversão das frentes de água das cidades portuárias como um momento particularmente importante para a diminuição das inundações pluviais, permitindo tomar opções que melhorem o escoamento das águas interiores e que evitem o seu provável avanço para dentro das cidades. De igual modo, a renovação do tecido urbano, apesar de pulverizada e aparentemente lenta, pode consistir numa solução incremental para o aumento da resiliência às inundações ou para a retenção de água no médio e longo prazo (Rijke, Veerbeek et al. 2010; Ven et al. 2011). Embora complexa, a gestão do problema das inundações na dimensão urbana é inegavelmente preferível à sua ignorância, permitindo sempre a realização de opções que, mesmo podendo ser difíceis ou distantes, são preferíveis à possibilidade da ausência de escolhas.

2.3. Medidas de adaptação ao risco de inundação urbana em frentes de água de deltas e estuários

Os factores que influenciam o risco de inundação pluvial nas frentes de água de deltas e estuários podem-se estender desde o local afectado em si mesmo até processos que ocorrem em locais muito distantes. Se num delta ou estuário o escoamento de um rio pode elevar o corpo de água adjacente à sua frente costeira ou ribeirinha, obstruindo a drenagem, então o desvio de um rio ou uma barragem podem ser considerados como uma medida de adaptação. A elevação da cota de entrada de um edifício, que impeça a entrada da água durante uma inundação, pode igualmente ser considerada uma medida com o mesmo objectivo. Assim, todas as medidas que permitem alterar a forma como a inundação é sentida num determinado local, podem ser consideradas medidas de adaptação às inundações pluviais, estendendo-se até aos limites dos processos hidrológicos envolvidos no escoamento das águas pluviais.

Dentro da variedade relativista de possíveis medidas, no presente trabalho optou-se pela sua divisão segundo três categorias particularizáveis na construção do risco de inundação das frentes de água de deltas e estuários, independentemente de serem estruturais ou não-estruturais⁴, centralizadas ou descentralizadas, e que se enumeram de seguida:

- O espaço para a água
- Espaço para o escoamento
- Resiliência

O espaço para a água consiste em medidas que permitem, de alguma forma, atenuar os caudais de ponta dos sistemas de drenagem durante as precipitações extremas e evitar o seu transbordo, cujos maiores impactos são sentidos nas frentes de água. O espaço para o escoamento baseia-se na melhoria do escoamento das frentes de água, cuja perda de eficiência é influenciada pelo aumento da SNMM, da subsidiência e do escoamento fluvial, afectando particularmente os deltas e estuários. A resiliência consiste na diminuição dos impactos pela preparação do tecido urbano no acomodar e recuperar das inundações.

As categorias enunciadas podem ter diversas ligações com aspectos técnicos muito particulares, como a bombagem de água ou o uso de materiais resistentes à água, cuja inovação tem sido crescente. No entanto, neste trabalho pretende-se abordar qual a contribuição e o potencial do desenho e planeamento urbano na integração de medidas para a diminuição do risco de inundação, e como estas se relacionam com o contexto das alterações climáticas,

⁴ As medidas podem ser consideradas estruturais quando implicam alterações concretas e pontuais no território, e não-estruturais quando se baseiam em medidas indirectas (e.g. prevenção, planeamento, sistemas de alertas, etc.).

assumindo que o redimensionamento da infra-estrutura de drenagem não pode ser realizado de forma extensiva.

A maioria das medidas para a diminuição do risco de inundação é já bastante conhecida e pouco inovadora e, com a exceção de alguns exemplos mais criativos, estas podem-se considerar 'fora de moda'. Aumentar áreas verdes, renaturalizar ribeiras ou utilizar pavimentos permeáveis, não constituem uma novidade, mas sobre o contexto das alterações climáticas adquirem uma nova e relevada importância (Bruijn et al. 2009; Costa 2011). Uma vez que o meio urbano não pode 'apenas' resolver problemas hidrológicos, a compatibilização com as funções e vivência da cidade são particularmente importantes, devendo as medidas adaptar-se da melhor forma possível aos diversos usos. Neste aspecto, a falta de espaço no meio urbano é um importante desafio para a integração de medidas, devendo estas encontrar a flexibilidade necessária para poderem constituir uma resposta válida. A compatibilização com outros sistemas e agendas da cidade, como o espaço público, a estrutura verde ou o clima urbano da cidade, podem facilitar a sua integração e contribuir de modo significativo para a melhoria da qualidade de vida e da sustentabilidade. No entanto, apesar de todo o espaço urbano poder integrar medidas para a diminuição do risco de inundação, no contexto das alterações climáticas estas devem sempre corresponder a uma estratégia integrada numa escala espacial e temporal mais vasta, que permita dotar o espaço urbano de uma estratégia de adaptação coerente, não se podendo limitar a uma leitura local ou de curto prazo.

2.3.1. Espaço para a água

Os sistemas de drenagem em meio urbano são dimensionados para precipitações estáveis, não se encontrando preparados para o aumento de eventos extremos. Como os picos de precipitação tenderão a aumentar e o escoamento costeiro será progressivamente mais lento, o seu transbordo também deverá ser mais frequente, com consequências maiores para as zonas de acumulação, como as frentes de água. De forma a diminuir os efeitos dos picos de precipitação, as cidades necessitam de aumentar a sua capacidade de armazenamento e retenção de água, de modo a evitar o escoamento superficial na superfície urbana e a sua acumulação tendencial nas zonas baixas. Esta solução permite diminuir os caudais de ponta dos sistemas de drenagem, a céu aberto ou no subsolo, sendo a água posteriormente escoada num momento mais favorável. Nos sistemas descentralizados, independentes da rede de drenagem, a água pode nunca chegar a entrar no sistema, podendo ser lentamente infiltrada no solo ou armazenada para outros fins.

A solução de armazenamento ou retenção é ainda particularmente importante nos locais em que ocorrem precipitações muito intensas e em que o declive e a impermeabilização excessiva podem dar origem a inundações rápidas. Nestes casos, os sistemas de drenagem não chegam a

ter capacidade para captar a água, tornando inevitável o escoamento superficial e a grande velocidade, com consequências geralmente catastróficas e de maior impacto nas frentes de água. Mas o armazenamento é igualmente importante nos deltas e estuários aplanados. O seu fraco potencial de escoamento não permite que a drenagem dependa apenas da fluidez nos pontos de descarga, necessitando de reter o excesso de água para evitar a inundação pluvial. A ocorrência de precipitações cada vez mais intensas implica assim a necessidade generalizada do aumento da sua capacidade de armazenamento. O impacto dos picos de precipitação é ainda agravado pela progressiva perda de eficiência do escoamento das frentes de água devido à SNMM, à subsidência e ao aumento do caudal fluvial, dilatando o tempo necessário para a descarga das águas pluviais interiores. Desta forma, o aumento do espaço para a água no meio urbano assume um importante papel, permitindo diminuir o escoamento da drenagem e/ou ampliar o seu tempo de descarga, evitando ou atenuando as inundações nas frentes de água (Figura 24).

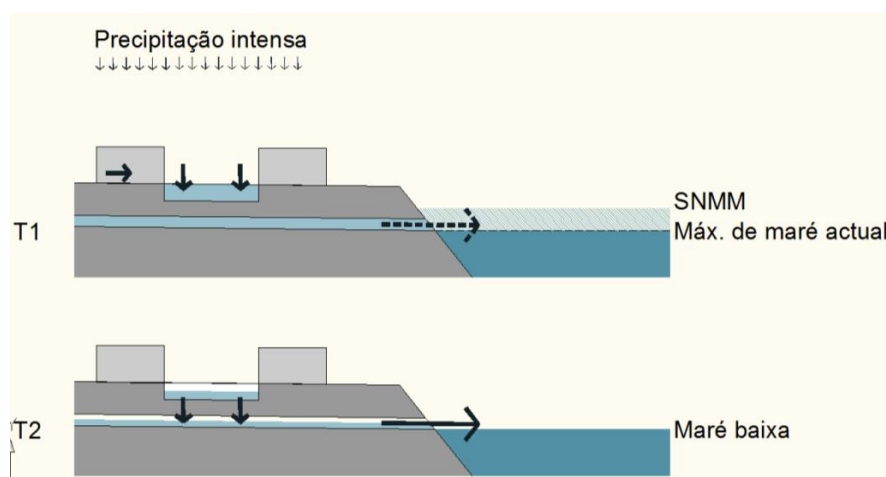


FIGURA 24. Corte esquemático da influência da retenção do escoamento na drenagem das frentes de água.
Fonte: Autor.

Um dos sistemas mais comuns e eficientes para fazer face a este problema consiste na construção de reservatórios ou depósitos enterrados de águas pluviais. Este tipo de infraestrutura permite acomodar rapidamente grandes quantidades de água, diminuindo com eficiência os impactos dos picos de concentração. Em Barcelona, onde as precipitações intensas são frequentes, os reservatórios enterrados constituem um importante suporte da rede de drenagem, com uma capacidade total de 415.000 m³ (Silva 2011). Localizados em pontos críticos das bacias de drenagem, permitem diminuir os efeitos do aumento da impermeabilização, evitando sobretudo a inundação da área costeira, onde as dificuldades de escoamento são maiores. A sua incorporação no subsolo permite a realização de outras funções à superfície (jardins, campos de jogos, praças, etc.), podendo passar totalmente despercebidos e ser facilmente integrados no meio urbano (Figuras 25 e 26).

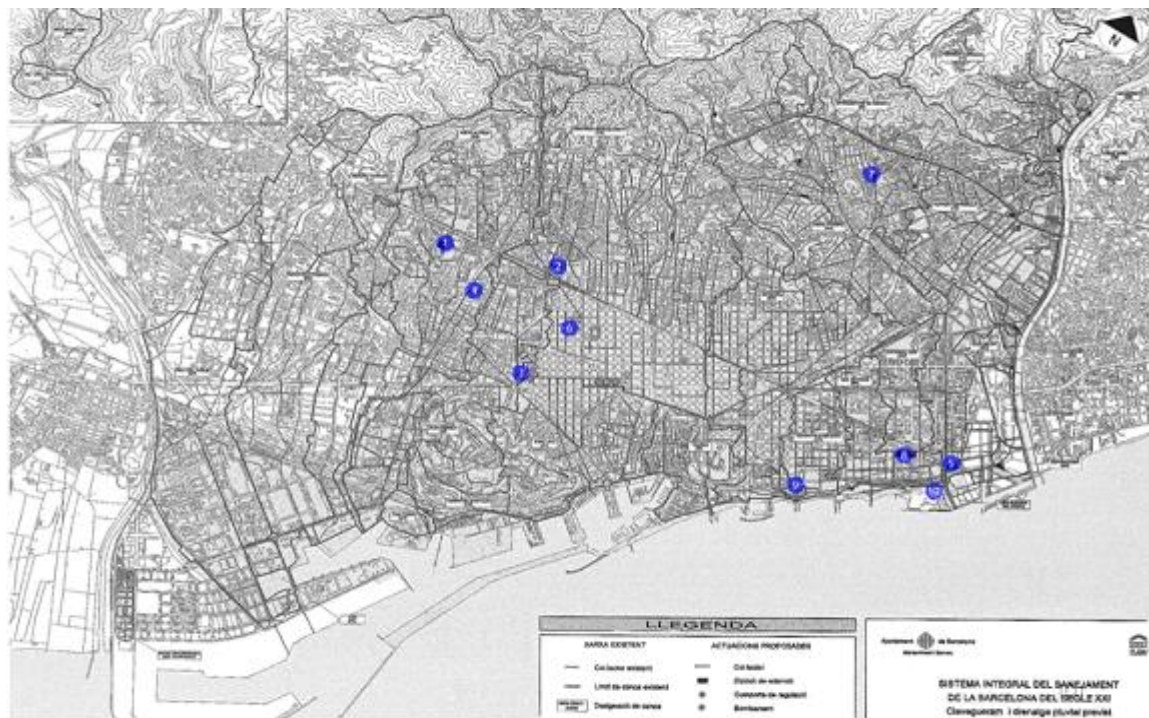


FIGURA 25. Localização dos depósitos de águas pluviais de Barcelona. Fonte: ACA (2009), in Silva (2011).

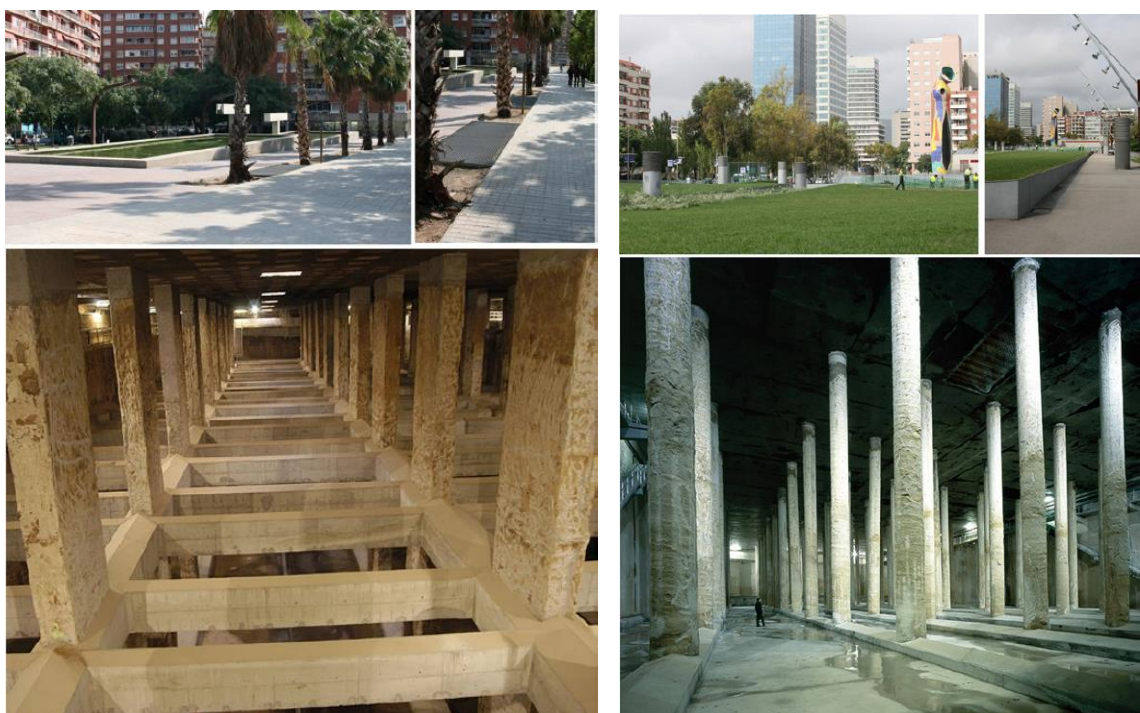


FIGURA 26. Depósito na Plaza Doctors Dolsa e no Parque Joan Miró. Fonte: M. M. Silva, in Costa (2011)

No entanto, e apesar da sua grande eficiência no imediato, as soluções estruturais de grandes depósitos são bastante dispendiosas e não diminuem o problema no longo prazo, sendo sempre necessário aumentar o seu número conforme o aumento da precipitação, da expansão urbana e da impermeabilização. Nesta óptica, o aumento do espaço para a água de forma descentralizada e/ou na origem, pode apresentar importantes vantagens no médio e longo prazo, tanto a nível económico como de sustentabilidade, complementando a capacidade dos grandes depósitos e diminuindo a necessidade da sua construção no futuro. A utilização de medidas 'leves' nas cidades tem um grande potencial quando usada de forma extensiva e pode ser realizada de forma flexível e incremental em praticamente todo o tecido urbano. Os edifícios podem armazenar água nos seus telhados ou em reservatórios no subsolo, os espaços pavimentados podem permitir a infiltração e a reserva de água e os espaços verdes podem armazenar água à superfície ou no solo.

Quando o desenho urbano é realizado de forma coordenada, as diversas tipologias podem-se complementar e operar processos hidrológicos como qualquer infraestrutura, mantendo as suas características e funcionalidades próprias. Um dos exemplos que melhor demonstra esta possibilidade é representado pelas 'praças de água', onde as estradas operam como autênticas condutas a céu aberto, drenando pequenas bacias ou sub-bacias ao nível do quarteirão para uma ou mais zonas de acumulação que, por sua vez, podem funcionar como praças ou campos de jogos em tempo seco e adquirir outras funções lúdicas no tempo húmido (Figura 27). A criatividade e imaginação do desenho urbano funcionam aqui como importantes ferramentas na adaptação de diversas funções para o mesmo espaço, podendo criar importantes ligações com a vivência do espaço público, através do lazer e da estética. Quando utilizadas em quantidade e em rede, o potencial de armazenamento pode atingir volumes importantes, evitando ainda os custos relacionados com a infraestruturação de condutas no subsolo (DE URBANISTEN 2013).

As linhas de água que atravessam as cidades podem também ser entendidas como um reservatório em situações de cheia, armazenando grandes quantidades de água. Apesar de no meio urbano se encontrarem geralmente regularizadas e confinadas, estas podem sofrer pequenas ou grandes alterações de modo a aumentar temporariamente o volume de água acumulada e aliviar o escoamento nas frentes de água (Figura 28 e 29). Em vez de serem entendidas como elementos que limitam o uso do solo urbano, as linhas de água podem ser olhadas como autênticos reservatórios a céu aberto, evitando a necessidade de expansão das redes de drenagem ou da construção de cisternas no subsolo, podendo ainda combinar a sua utilização enquanto espaço público multifuncional, estrutura ecológica, regulação do clima urbano, filtro natural da água, etc., com importantes impactos sociais e ambientais nas cidades. Da mesma forma, o desenho de parques, espaços verdes, jardins de chuva, campos desportivos, assim como de espaços supérfluos, podem incorporar bacias de retenção temporárias ou permanentes, combinando diferentes funções hidrológicas e de vivência urbana (Figura 30 e 31).

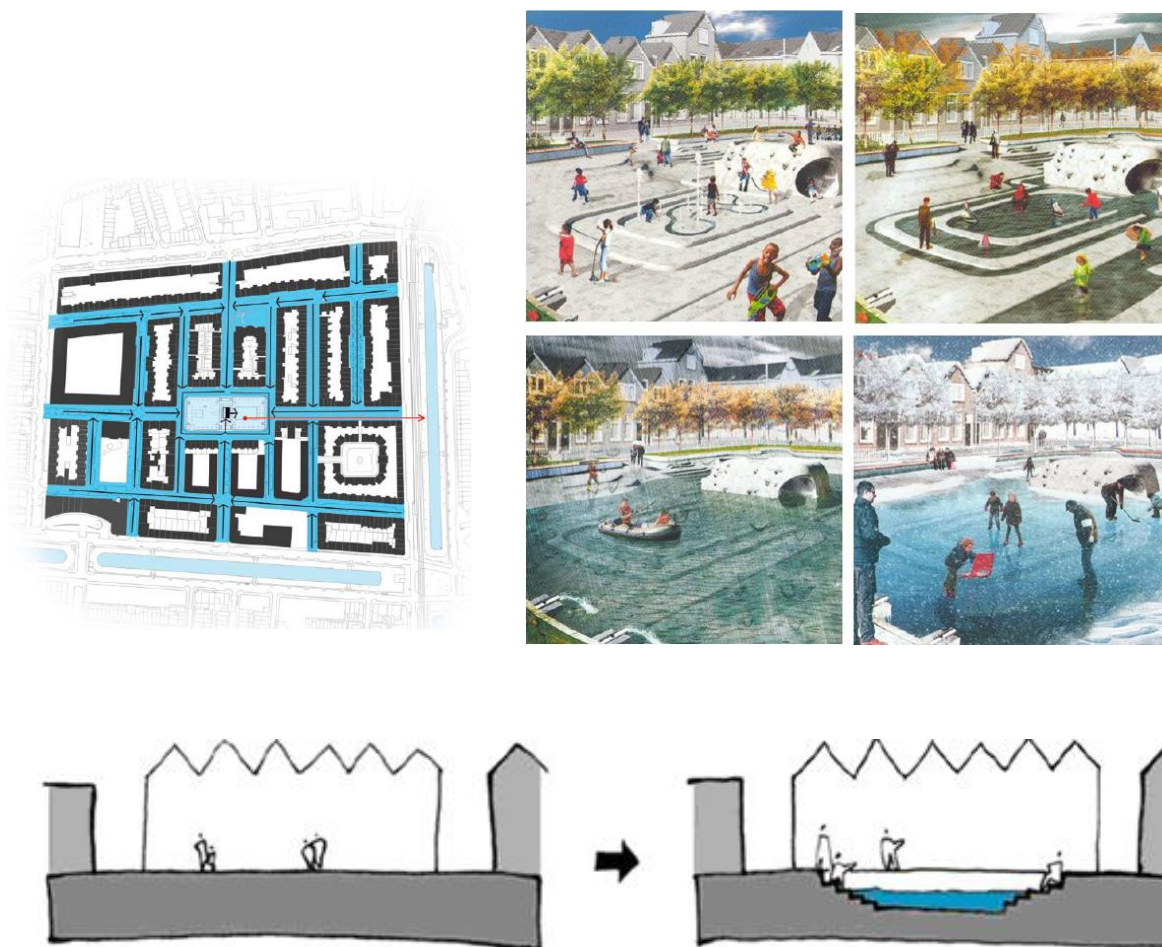


FIGURA 27. Conceito de praça de água. O espaço assume diferentes funções conforme as estações. A drenagem pode ser realizada em bacias locais, ao nível do quarteirão ou do bairro. Fonte: DE URBANISTEN (2013).



FIGURA 28. Canal/bacia de retenção em Roterdão. Nos momentos de cheia a água é suportada por um pequeno muro e pela modelação do terreno. Fonte: Boer, Jorritsma, Van Peijpe (2010), in Costa (2011).

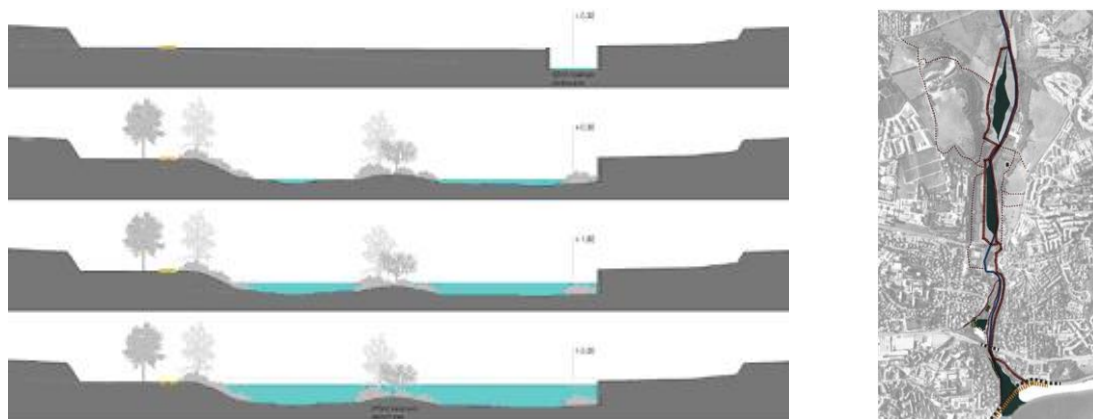


FIGURA 29. Proposta para a abertura do canal da Ribeira da Lage e criação de uma bacia de retenção/parque na Quinta do Marquês, Oeiras. Fonte: Autor.

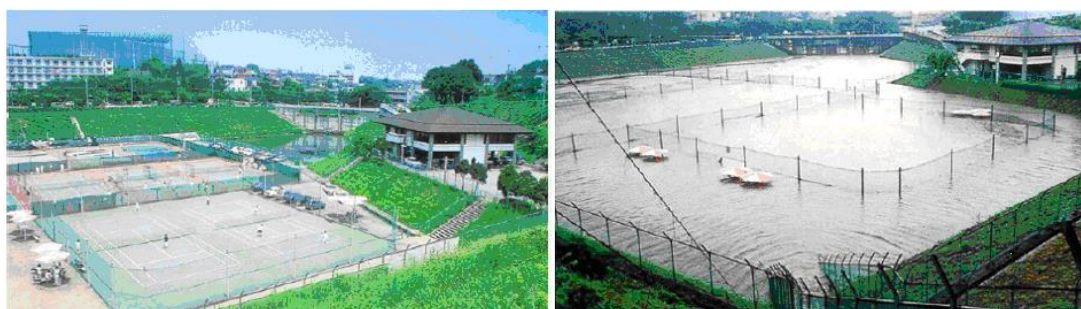


FIGURA 30. Bacia de retenção ocupada por campo de ténis nos períodos secos. Fonte: Yoshitani (2008) in Costa (2011).



FIGURA 31. Diferentes tipologias de bacias de retenção. Fontes: (CCDR-LVT 2007; Bruijn et al. 2009; Boer 2012).

A retenção de água no meio urbano pode-se ainda estender às coberturas do tecido edificado, podendo funcionar como uma importante 'rede' de armazenamento e de captação na origem, especialmente nas cidades muito densas. A maior limitação para a implementação das coberturas 'azuis' consiste na falta de capacidade de suporte dos edifícios existentes para

acumularem grandes volumes de água, mas estas podem ser incluídas na renovação urbana e ainda ser complementadas por reservatórios enterrados. Esta solução apresenta diversas vantagens, podendo a água armazenada ser posteriormente reutilizada em diversas funções do edifício (rede de águas sujas), na rega de coberturas verdes ou no espaço público adjacente, diminuindo as necessidades de abastecimento de água e regulando a temperatura dos edifícios, aumentando a sustentabilidade do meio urbano, e atenuando os impactos das ilhas de calor e das secas (Figura 32).

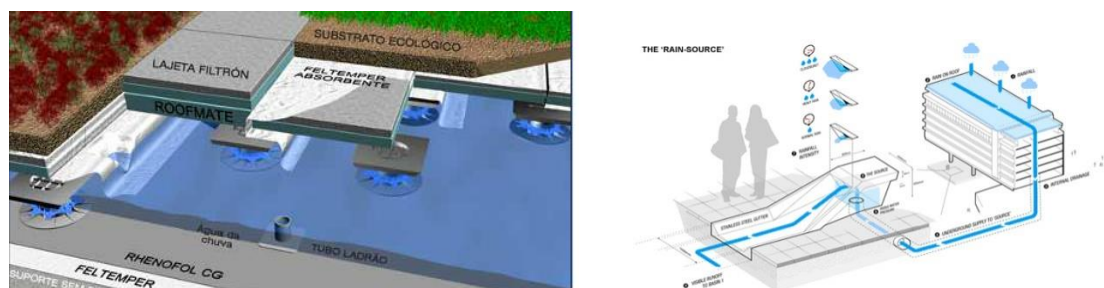


FIGURA 32. Pormenor de construção de cobertura verde e azul (esq.) e esquema de captação de água na cobertura dos edifícios para uso em peça de água no espaço público (dir.). Fonte: Intemper (2013) e DE URBANISTEN (2013), respectivamente.

Para além das diversas e importantes adaptações que o meio urbano pode fazer para aumentar a sua retenção de água, um dos principais factores que contribui para a ocorrência de inundações pluviais é a excessiva impermeabilização do solo (Bruijn et al. 2009; EEA 2012b). Para diminuir este efeito, a expansão das áreas verdes e o uso de pavimentos permeáveis são particularmente importantes na regulação do escoamento superficial. Porém, durante as precipitações intensas, o processo de infiltração no solo não é suficientemente rápido para diminuir de forma significativa o escoamento superficial, sendo muito mais eficiente para chuvas moderadas ou ligeiras. Sendo os picos de precipitação geralmente precedidos de chuva, o solo ou o pavimento encontram-se parcial ou totalmente saturados, perdendo grande parte da sua eficiência na diminuição do escoamento. Desta forma, a retenção de água não pode ser vista apenas de um modo abstracto, tendo de ser incorporada nos métodos de construção. Nos espaços verdes o problema pode ser ultrapassado pelo aligeirar das camadas superiores do solo com areia ou turfa e/ou pela construção de valas de brita ou poços de infiltração (Figura 33). Neste aspecto, a forma como o solo é gerido é particularmente importante, implicando algumas mudanças na forma como os espaços verdes são desenhados e utilizados. Enquanto um relvado não possui uma grande capacidade de armazenamento, funcionando quase como um acelerador do escoamento, um prado ou uma horta têm uma capacidade muito maior de retenção. De modo semelhante, o uso de pavimentos permeáveis só é relevante para a retenção quando estes são acompanhados de uma camada de reservatório, uma vez que os pavimentos permeáveis têm uma capacidade muito reduzida de retenção (Matos 2008). Desta forma, para além da expansão

de áreas verdes na cidade, a sua qualificação como 'infraestrutura verde de drenagem' pode permitir que estes sejam utilizados e quantificados como um reservatório para as situações extremas. As vantagens associadas ao uso de espaços verdes drenantes são diversas e com relevância acrescida no contexto das alterações climáticas, permitindo diminuir as necessidades de rega, regular a temperatura no meio urbano ou purificar a água (Figura 34).

Tal como referido, as medidas descentralizadas podem não permitir uma diminuição imediata e significativa das inundações. No entanto, devido à sua elevada flexibilidade de integração no meio urbano e ao baixo custo associado, estas podem ganhar relevância no médio e longo prazo, conforme a regeneração urbana for decorrendo e quando os efeitos das alterações climáticas forem mais acentuados. O potencial e a aplicabilidade deste tipo medidas são grandes, podendo-se estender a todas as bacias de drenagem que desaguam nas frentes de água, diminuindo os seus impactos. Desta forma, a reformulação da leitura dos processos hidrológicos da paisagem urbana, aliada a um planeamento e desenho urbano que conecte cada local a um contexto e um horizonte temporal mais abrangente, podem constituir importantes ferramentas da adaptação às inundações nas frentes de água.

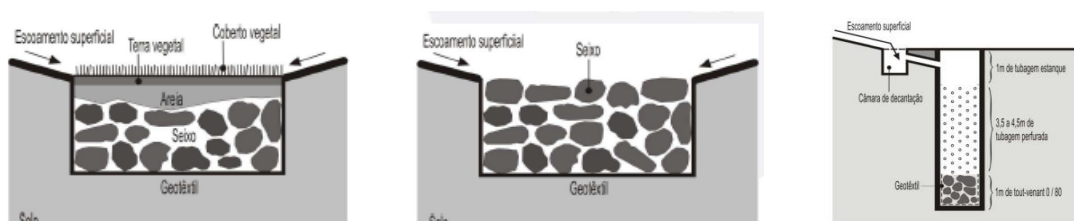


FIGURA 33. Pormenores de construção de trincheiras verdes e de calhau rolado (esq. e meio), e de poço de infiltração. Fonte: Matos (2008).

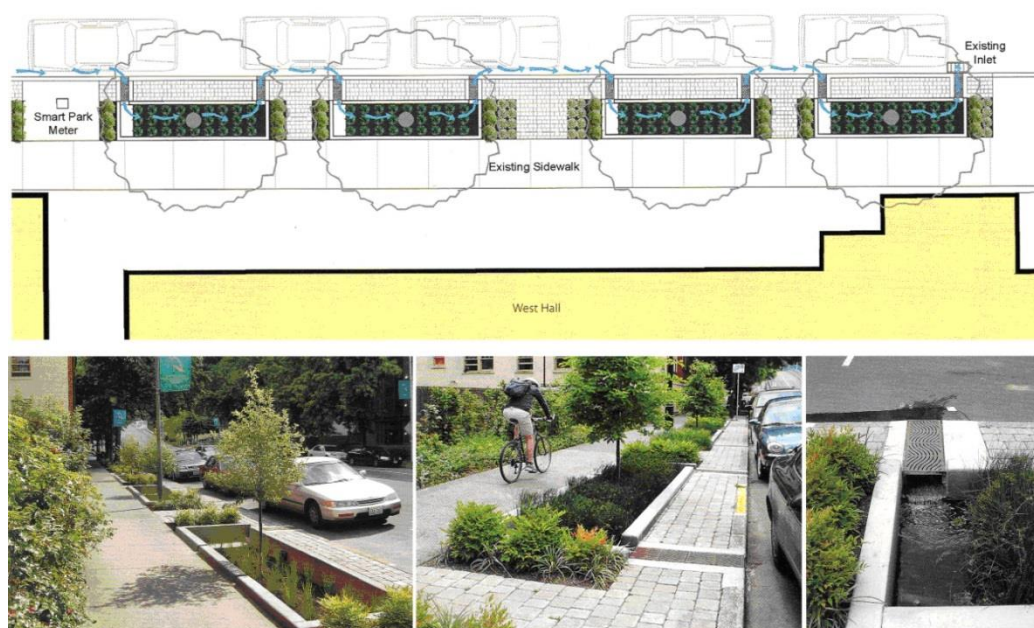


FIGURA 34. Exemplo de um sistema de drenagem urbana sustentável (SUDS). Fonte: Margolis e Robinson (2007).

2.3.2. Espaço para o escoamento

O escoamento das águas interiores das frentes de água de deltas e estuários depende da sua desobstrução nos pontos de descarga localizados ao longo da linha costeira. Estando os pontos de descarga localizados a uma cota altimétrica próxima do nível máximo de maré, sobretudo devido ao relevo aplanado, a capacidade de escoamento das frentes de água tenderá a ser cada vez menor no contexto das alterações climáticas. A SNMM associada a um possível aumento do caudal fluvial e/ou do fenómeno de subsidiência, tenderá a diminuir progressivamente a eficiência do escoamento, aumentando a probabilidade de inundação nas frentes de água na coincidência de precipitação com marés altas (Figura 35).

Nesta perspectiva, a diminuição do risco de inundação nas frentes de água depende da melhoria do escoamento das suas águas interiores. Estando os pontos de descarga geralmente confinados a canais a céu aberto ou no subsolo, uma das formas de melhorar o seu escoamento consiste na sua abertura ou alargamento, aumentando a sua secção de descarga (Figura 36). Apesar de a abertura de canais poder ser difícil no meio urbano consolidado, implicando grandes alterações em diversas infraestruturas e custos elevados, a sua realização poderá ser a mais viável nos casos em que a drenagem das águas interiores se encontra muito estrangulada e sem capacidade para fazer face a precipitações cada vez mais intensas, impedindo a expansão das inundações para áreas cada vez mais interiores (Figura 37). Assim, as intervenções ao longo das frentes de água devem ter em conta os cenários futuros das alterações climáticas, facilitando o escoamento das águas pluviais. Embora a abertura ou ampliação de ribeiras possam ser entendidas como tubagens ou canais com uma operacionalidade ampliada, a sua integração no meio urbano é ainda valorizada pela sua utilização enquanto espaço público multifuncional, pela reposição de vegetação e habitats de zonas húmidas, ou como um elemento de regulação do clima urbano, atenuando as ilhas de calor (Figuras 38 e 39). A abertura de linhas de água pode permitir ainda que estas funcionem como reservatórios a céu aberto, podendo armazenar ou deter temporariamente grandes quantidades de água.



FIGURA 35. Inundação da Ribeira da Lage (Oeiras), em 2008, na coincidência de precipitação com maré-alta. Fonte: Alexandre Lisboa.

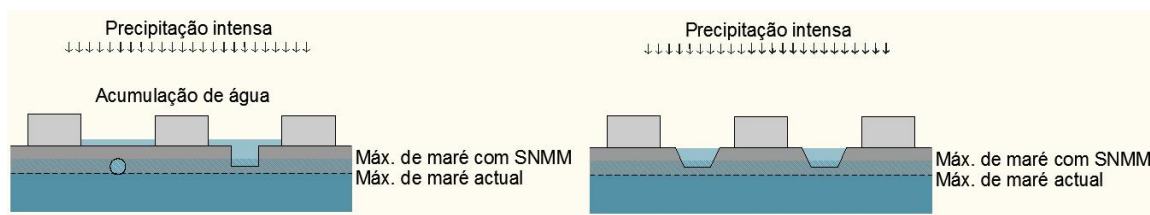


FIGURA 36. Alçado frontal de esquema de frente de água com escoamento canalizado a céu aberto e no subsolo (esq.). A abertura ou o alargamento da canalização podem permitir evitar as inundações urbanas (dir.). Fonte: Autor.



FIGURA 37. Canal original (esq.), actualmente como auto-estrada (meio) e projecto de reconversão (dir.). Fonte: Team Urban Water Management Deltares (2009).



FIGURA 38. Parque de Besòs, Barcelona, com caudal regular (esq.) e em períodos de cheia. Fonte: (Silva 2011).



FIGURA 39. Parque urbano da Agualva-Cacém. A ampliação das margens pela remoção de edifícios permitiu melhorar o escoamento e diminuir o número de inundações, sendo actualmente utilizado como parque urbano. Fonte: Autor.

O escoamento das frentes de água dos deltas e estuários pode ainda ser regulado por medidas que permitam controlar as marés oceânicas e o caudal fluvial a um nível regional mas com influência local. A construção de barreiras de sobrelevação, de barragens ou de medidas de espaço para a água dos rios, permitem controlar o nível da água e impedir a obstrução da drenagem costeira. Embora na perspectiva das inundações este tipo de medidas sejam realizadas principalmente para evitar a submersão costeira ou fluvial, elas acabam por permitir que as cidades consigam escoar as suas águas com maior facilidade em momentos críticos.

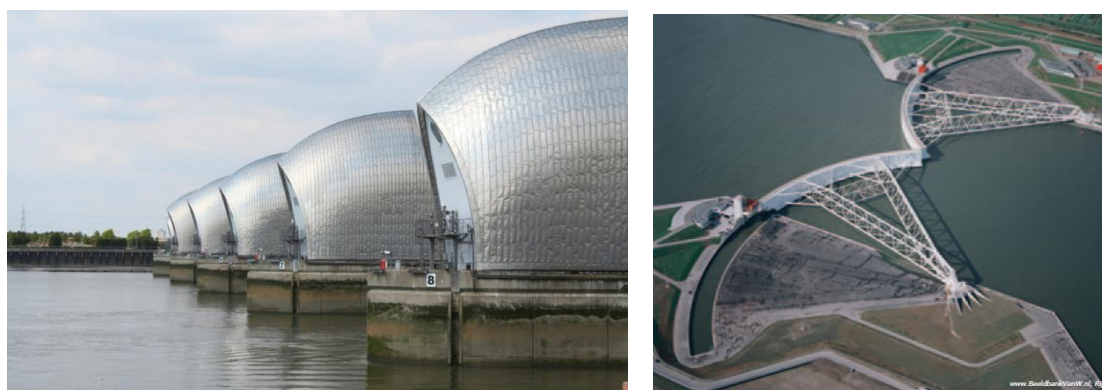


FIGURA 40. Barreira de sobrelevação do estuário do Tamisa (esq.) e do delta do Reno e do Meuse. Fonte: (Most et al. 2009).

2.3.3. Resiliência

Os eventos de inundação, de uma forma geral, nem sempre são evitáveis. Quando a sua frequência se mantém baixa ou com um impacto reduzido, o meio urbano pode conviver com inundações regulares, mantendo as suas qualidades de segurança e de funções. De modo a diminuir a sua exposição aos eventos de inundação, os edifícios, as infraestruturas e o espaço público podem preparar-se de modo a acomodar a água e realizar uma rápida recuperação (Gersonius, Zevenbergen et al. 2008). Sendo as frentes de água uma das áreas mais sensíveis aos presentes e futuros fenómenos de inundação, a sua preparação para diminuir os impactos das inundações pode consistir numa estratégia viável e, muitas das vezes, a única possível para além do 'abandono', 'retirar' ou do 'não fazer nada' (Bruijn et al. 2009; Peel 2009).



FIGURA 41. Resposta resiliente às inundações urbanas. Paris, Janeiro de 1910. Fonte: (Bruijn et al. 2009).

As estratégias de resiliência encontram-se já muitas vezes presentes nos locais em que as inundações são frequentes. Elevar uma entrada, encaminhar a água ou proteger portas e janelas com barreiras, são soluções comuns em cidades de todo o mundo. No contexto das alterações climáticas, a resiliência pode ser aplicada com antecipação no desenho e planeamento urbano, prevendo a extensão e amplitude da inundação nos futuros cenários. As medidas aplicáveis são diversas, adaptando-se a cada tipologia urbana, podendo ainda ser estruturais ou não estruturais.

As medidas estruturais em edifícios podem consistir em pequenas barreiras amovíveis ou permanentes; subida de entradas; uso de materiais à prova de água; protecção ou realocação a cotas superiores de bens ou equipamentos; construção sobre plataformas elevadas, estacas ou flutuantes, entre outras. No espaço público os impactos também podem ser diminuídos pela subida de passeios; rebaixamento de estradas; encaminhamento da água; estanquicidade de redes e infraestruturas; etc., compatibilizando as funções urbanas com a ocorrência de inundações (Bruijn et al. 2009; Costa 2011; Ven et al. 2011). Nas frentes de água, o desenho da malha urbana pode assumir uma grande importância pelo facilitar do escoamento superficial da água, cuja obstrução pode aumentar exponencialmente os impactos das inundações.

Mas a resiliência pode ainda ser melhorada através de medidas não-estruturais, nomeadamente pelo planeamento segundo princípios de precaução, tendo como objectivo a diminuição progressiva da exposição em infraestruturas vitais ou edificações futuras, quer pela sua localização em locais seguros, quer pela construção de edifícios preparados em locais de

risco. As medidas não-estruturais contemplam ainda a integração de planos de emergência, rotas alternativas ou locais seguros.

Tal como as restantes medidas de adaptação, as de resiliência podem ser gradualmente incorporadas no meio urbano, segundo um planeamento coordenado com a expansão dos riscos de inundação ou de forma mais flexível, ao nível individual de cada edifício (Figura 42).

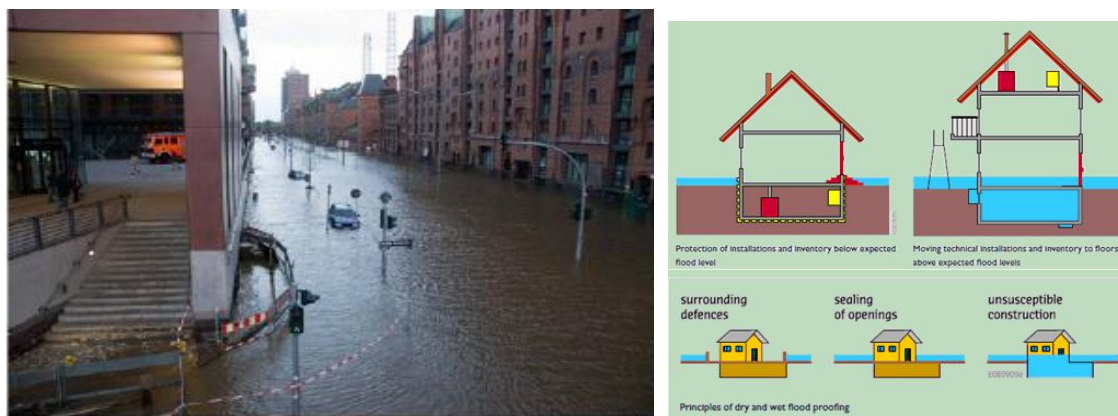


FIGURA 42. Operação de regeneração urbana da “HafenCity” em Hamburgo, aceitando a inundação periódica e antecipando os cenários futuros (esq.) e medidas de resiliência ao nível do edifício (dir.). Fonte: Muller, 2010 in Costa (2011) e Bruijn et al. (2009).

CAPÍTULO III

O risco de inundação urbana na frente ribeirinha de Lisboa em cenários de alterações climáticas

Após a prévia exposição da evolução dos principais factores climáticos na alteração do risco de inundação pluvial e da transposição genérica dos seus impactos para as frentes de água de deltas e estuários, o presente trabalho pretende contextualizar o problema para a frente ribeirinha de Lisboa. A escolha de Lisboa deveu-se a esta ser uma cidade de estuário, com influência fluvial e marítima, muito dependente do sistema de drenagem artificial, com problemas de inundações urbanas frequentes, nomeadamente na frente ribeirinha e linhas de água, e por concentrar na sua frente um tecido urbano consolidado, cujo abandono acelerado teria consequências críticas para toda a cidade e área metropolitana.

A análise realizada não pretende demonstrar com exactidão os impactos futuros nem apontar soluções ideais para as inundações urbanas da frente ribeirinha. O seu objectivo consiste na exposição e compreensão dos princípios genéricos das actuais relações hidrológicas de escoamento das águas pluviais na frente ribeirinha de Lisboa e na contextualização das suas prováveis consequências em cenários de alterações climáticas, na perspectiva de alertar para existência do problema e das limitações do actual sistema de drenagem. Pretende-se assim que o presente enquadramento contribua para a futura formulação de respostas que tenham em conta o potencial do planeamento, do desenho urbano e dos processos naturais como um importante complemento na definição da infraestrutura de drenagem e na atenuação dos impactos da frente ribeirinha.

3.1. Caracterização do escoamento superficial da frente ribeirinha

A frente ribeirinha de Lisboa é constituída por uma estreita faixa aplanada adjacente à linha costeira do estuário do Tejo estendendo-se do limite ocidental ao oriental. Simultaneamente influenciada pelo fluxo de água do estuário e do escoamento das águas interiores de Lisboa, a frente ribeirinha caracteriza-se por ser um subsistema húmido de transição fluvial-estuarino, estendendo os seus limites aproximadamente até à cota dos 5 m e pelo interior das linhas de água até à mudança para o sistema fluvial (Figura 43). Ao contrário das zonas de delta, que são geralmente planas e com uma rede hidrográfica interna pouco definida, as linhas de água que desaguam na frente ribeirinha são fortemente vincadas no território, promovendo um escoamento rápido e localizado. As linhas de água são diversas, sendo as de maior apanhamento as bacias hidrográficas de Alcântara (4700 ha), Chelas (743 ha), Beirolas, Algés e Terreiro do Paço (620 há) (Oliveira e Ramos 2002; CML 2010). No encontro entre a frente ribeirinha e as linhas de água, o escoamento superficial é desacelerado e alargado devido ao relevo plano da frente ribeirinha (inferior a 5%) e à interrupção da morfologia de vale. Este comportamento deve-se à origem essencialmente artificial da frente ribeirinha, cuja construção foi realizada ao longo do tempo pela acção humana através de sucessivos aterros sobre o estuário, tendo como principal fim a instalação de infra-estruturas portuárias, industriais e de transporte (Costa 2011) (Figura 44). A sua construção acaba por funcionar como uma expansão da superfície de transição fluvial-estuarina original, tendo como consequência o favorecimento da acumulação de água, tornando a sua área de intercepção com os pontos de descarga dos vales em zonas muito sensíveis à ocorrência de inundações urbanas.

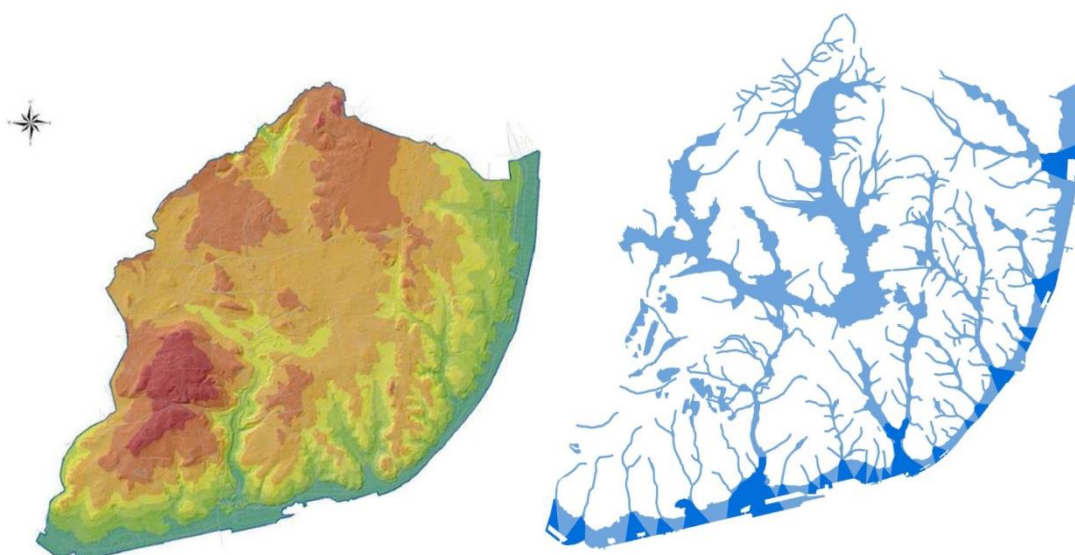


FIGURA 43. Hipsometria (esq.) e sistema húmido e subsistema de transição fluvial-estuarino no concelho de Lisboa (dir.). Fonte: CML (2010).

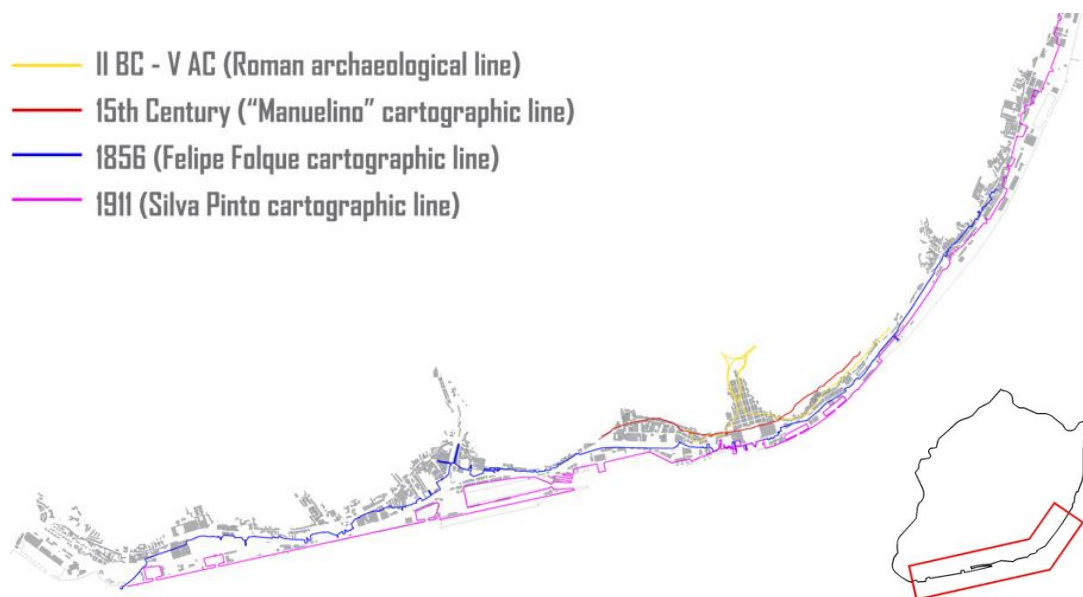


FIGURA 44. Evolução histórica dos aterros na frente ribeirinha de Lisboa. Fonte: Costa e Silva (2012).

Para além do encaminhamento do escoamento ao longo das linhas de água, e não se pretendendo no presente trabalho fazer uma análise bacia a bacia, embora determinante na definição do escoamento e dos impactos das inundações, importa referir o relevo muito acentuado das vertentes dos principais vales que desaguam na frente ribeirinha, nomeadamente na bacia de Alcântara, Terreiro do Paço e Chelas, e que contribui para a aceleração do escoamento e para a diminuição dos tempos de concentração na sua foz. Ao contrário dos deltas aplanados, o potencial de escoamento da cidade é grande devido ao relevo, excepto na frente ribeirinha e na área planáltica a norte da cidade, entre Sete Rios, Benfica, Lumiar, Campo Pequeno e Aeroporto.

A quantidade e velocidade do escoamento superficial são ainda alteradas pela elevada impermeabilização da cidade, estimando-se que cerca de 60% do solo se encontre pavimentado ou edificado (EEA 2012b). Os processos naturais de infiltração encontram-se assim minimizados, inclusivamente nas principais linhas de água, onde se localizam os solos mais permeáveis (Figura 45). De um modo genérico, o escoamento superficial a montante da frente ribeirinha pode ser caracterizado como rápido, devido ao relevo acentuado e à impermeabilização, e concentrado nos pontos de intersecção com as linhas de águas, tornando estas áreas como as mais dependentes do correcto funcionamento do sistema de drenagem para evitar a ocorrência de inundações urbanas.



FIGURA 45. Ribeira de Alcântara antes da canalização em 1910 (esq.), durante a canalização (1945) e como Av. de Ceuta (1949) (dir.). Fonte: pedrodepinto (2007).

3.2. Caracterização do sistema de drenagem artificial da frente ribeirinha

O escoamento da cidade de Lisboa é realizado pela rede de drenagem de Esgotos Domésticos e Águas Pluviais de Lisboa, sendo constituído por cerca de 1500 km de colectores, divididos por 4 subsistemas principais: o de Alcântara, Beirolas, Chelas e Frielas (CMLRCB). Cada um dos subsistemas é centralizado por uma ETAR, para onde é encaminhada a água das diversas bacias que compõem o subsistema e onde é realizado o seu tratamento. Desta forma, a rede hidrográfica natural de escoamento é alterada e substituída pelo funcionamento da infraestrutura (Figura 46).

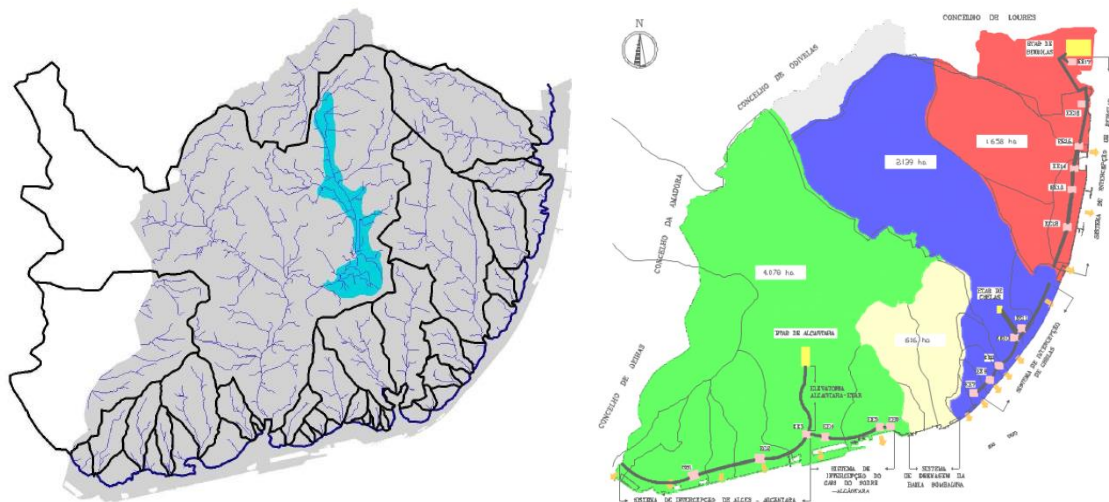


FIGURA 46. Bacias hidrográficas naturais (esq.) e bacias de drenagem do sistema artificial (Alcântara, Beirolas, Chelas e Frielas) (dir.) Fontes: (CML 2009; CML 2010).

O sistema de drenagem da rede águas pluviais e domésticas de Lisboa é maioritariamente unitário ou misto, ou seja, não existe uma separação efectiva entre as águas pluviais e domésticas, sendo estas encaminhadas de forma indiferenciada para cada uma das ETAR's. O

escoamento pluvial de montante, assim como as águas domésticas, é interceptado pelos colectores da frente ribeirinha, sendo reencaminhado de forma gravítica e através de estações elevatórias pontuais para cada uma das ETAR's e posteriormente descarregado no estuário após o tratamento (Figura 47). No entanto, durante a ocorrência de precipitações mais intensas, o sistema de circulação e tratamento entra em excesso de carga, encaminhado apenas uma pequena parte das águas para as ETAR's e drenando o remanescente directamente para estuário. Durante estes eventos, o escoamento é realizado de forma essencialmente gravítica ao longo da rede, sendo a água descarregada através dos diversos emissários costeiros localizados ao longo linha de costa (Figura 48).



FIGURA 47. Rede de circulação e de drenagem na frente ribeirinha da sub-bacia de Alcântara. Fonte: Martins (2012).

Os eventos de inundação urbana ocorrem quando a precipitação é superior à capacidade de entrada na rede, originado escoamento superficial, e quando o sistema de drenagem não consegue acomodar a totalidade do escoamento nas suas tubagens, levando ao transbordo para a superfície. Em ambos os casos, a frente ribeirinha constitui o local com maior susceptibilidade para a inundação, seja pelo escoamento superficial ou pela concentração dos maiores caudais nos pontos de descarga da rede. Os problemas de drenagem são ainda agravados quando existe a coincidência de preia-mar com precipitação intensa, diminuindo a eficiência do escoamento dos emissários costeiros. Nestas ocasiões, o corpo de água do estuário realiza um efeito 'tampão', obstruindo a descarga de água, cuja acumulação em excesso nas tubagens leva ao seu transbordo para a superfície. O efeito de preia-mar pode ainda ser agravado pela entrada de água do rio através dos emissários, sobrecarregando todo o sistema ao longo da frente ribeirinha, embora este problema encontre-se actualmente a ser tratado pela instalação de válvulas de maré, tais como as recentemente instaladas na reformulação do Terreiro do Paço. Devido à antiguidade de diversas condutas, um problema comum na coincidência entre maré-alta e precipitação intensa, consiste na ruptura dos colectores devido ao excesso de pressão da água, dando origem a importantes inundações e à interrupção do escoamento.



FIGURA 48. Sistema de drenagem na frente ribeirinha de Lisboa (linhas vermelhas). Na ocorrência de precipitações intensas, a drenagem gravítica depende dos diversos emissores ao longo da costa. Fonte: CML (2011).

De um modo geral, o sistema de drenagem de Lisboa não possui uma grande capacidade de armazenamento, apostando quase totalmente no envio directo para o ponto de descarga quando os caudais são elevados⁵. Embora o escoamento gravítico seja facilitado pela pendente, a ausência de sistemas de retardamento a montante não permite diminuir os caudais de ponta na frente ribeirinha quando as precipitações são demasiado intensas, dando origem a concentrações elevadas nos pontos de intersecção com as principais linhas de água, favorecendo a ocorrência de sobrecargas e de transbordos para a superfície. O problema é ainda agravado pela impermeabilização e pelo relevo, cuja combinação não permite dilatar os tempos de escoamento, ficando a ocorrência de inundações muito dependente da velocidade da descarga costeira. No entanto, a emissão costeira encontra-se maioritariamente confinada no subsolo, não permitindo qualquer flexibilidade de escoamento para além da dimensionada, estando ainda a sua eficiência dependente da desobstrução do estuário.

De modo a compreender as limitações do sistema de drenagem na frente ribeirinha e a sua relação com a precipitação, seguidamente analisa-se a frequência e localização das inundações urbanas, na perspectiva de contextualizar os prováveis impactos locais das alterações climáticas, nomeadamente pelo aumento da intensidade das precipitações extremas e da subida do nível do mar.

⁵ A rede de drenagem é complementada por 5 reservatórios no subsolo, localizados a montante (Campolide/Benfica, Av. Novas, Alameda, Olaias e Av. de Berna), provavelmente não permitindo atenuar significativamente a ocorrência de inundações na frente ribeirinha (CML 2012).

3.3. As inundações urbanas na frente ribeirinha

A cidade de Lisboa possui um clima de tipo mediterrânico, com um Verão quente e seco, concentrando a maior parte da precipitação no período entre Outubro e Abril. Os valores médios anuais rondam os 650 a 760mm (1961-1991), com os máximos mensais a registarem-se durante os meses de Novembro (160 mm) a Fevereiro. Registam-se ainda períodos curtos de precipitação intensa, sobretudo em Novembro, e situações frequentes de temporal (CML 2010). Devido à precipitação irregular ao longo do ano e concentrada em chuvas intensas, o escoamento superficial das principais linhas de água caracteriza-se como de regime torrencial, ou seja, com grandes oscilações de caudal ao longo das estações do ano.

A maioria das inundações urbanas coincide com os períodos de precipitação intensa, ocorrendo sobretudo durante o Outono, cerca de 41%, e com maior intensidade no mês de Novembro, quando se registam os maiores picos de precipitação (Oliveira et al. 2002). Desde o início do século XX, os registos marcam um período acentuado entre 1934 e 1970 (Figura 59), coincidente com o aumento da precipitação anual e um índice NAO negativo (Figura 8), caindo de forma significativa a partir de então, resultado da diminuição generalizada da precipitação e da melhoria da eficácia do sistema de esgotos e águas pluviais (Oliveira 2005). Os registos apontam que a grande parte das inundações (84%) em Lisboa para o período de 1918-1998 tem origem em chuvadas curtas com menos de 6 horas, e que a maioria destas ocorre para valores entre os 5 a 15mm/h (Oliveira et al. 2002). Nos eventos mais extremos, com valores de precipitação total superiores a 50 mm/dia e a 15mm/h, ocorrem sempre inundações generalizadas. Desta forma, pode-se concluir que as inundações urbanas têm uma relação directa com a precipitação, sobretudo com a intensidade, e principalmente com os episódios de curta duração, revelando o subdimensionamento do sistema de drenagem para os eventos mais intensos.

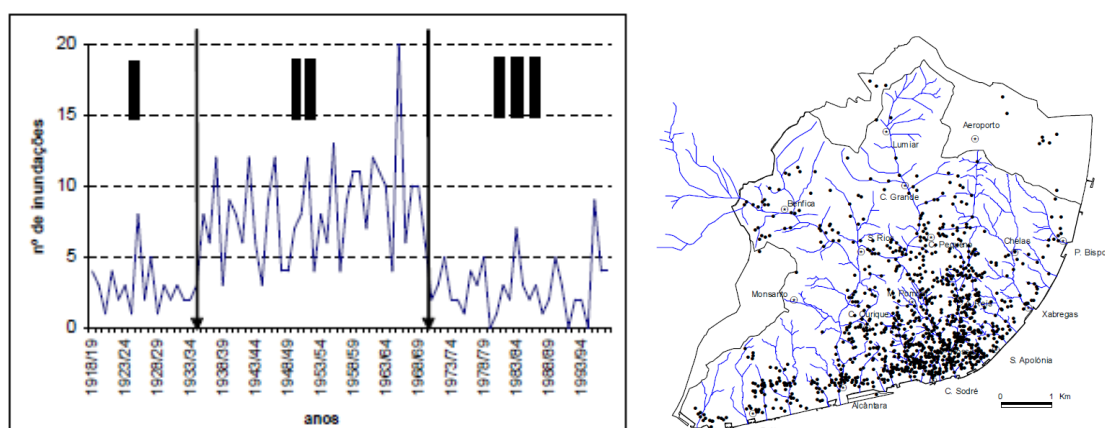


FIGURA 49. Tendência evolutiva das inundações por ano para a cidade de Lisboa entre 1918 e 1998 (esq.) e a sua distribuição espacial. Fonte: Oliveira (2005) e Oliveira et al. (2002), respectivamente.

A análise da distribuição dos locais inundados permite compreender, como seria previsível, que a maioria das inundações ocorre ao longo do traçado das antigas linhas de água e de forma mais acentuada nas zonas baixas junto à frente ribeirinha (Figura 60). A análise entre 1917 e 1997 indica que a frente ribeirinha é o local mais inundado, com 155 inundações na Rua dos Caminhos de Ferro a Santa Apolónia, 142 na 24 de Julho, 123 em Xabregas e 90 na Rua de São Paulo, ou seja, com uma frequência de 1 a 2 inundações anuais (Oliveira, 2002). Quando analisada a partir de 1970, no momento em que o sistema de drenagem sofreu alterações e a precipitação anual diminuiu abruptamente, é perceptível que o número de inundações sofreu uma redução considerável a montante e que a sua ocorrência a jusante depende de precipitações horárias cada vez mais intensas (Oliveira 2002) (Figura 50). No entanto, a manutenção das inundações na frente ribeirinha e a ausência de sistemas de armazenamento nas áreas de escoamento rápido, poderá indicar que o sistema de drenagem está apenas a encaminhar a água de forma mais eficiente para a descarga costeira, ou seja, em maior quantidade e velocidade. Apesar das vantagens evidentes na diminuição do risco de inundação urbana de um modo geral, o aumento da sua eficiência implica a diminuição do tempo de concentração na frente ribeirinha, o que poderá originar impactos potencialmente maiores nesta área nos momentos em que o escoamento costeiro não for facilmente realizável.

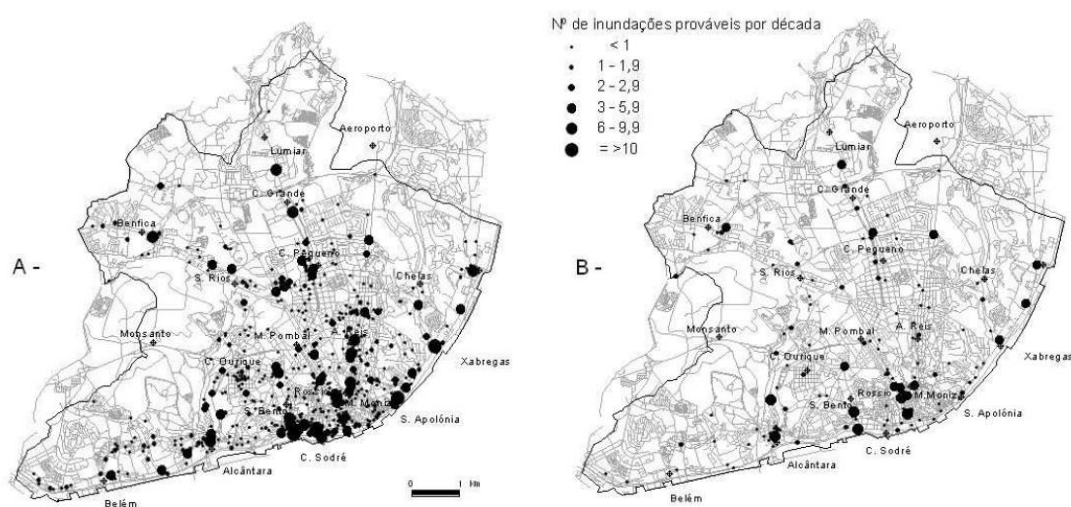


FIGURA 50. Nº de inundações por década e por local inundado na cidade de Lisboa: A- (com mais de dois episódios) entre 1918/19 e 1997/98; B - entre 1970/71 e 1997/98. Fonte: Oliveira (2005).

De forma semelhante ao registo geral das inundações, a cartografia de risco de indica a maior vulnerabilidade da frente ribeirinha em relação a toda a cidade. Baseada na modelação do escoamento⁶ para diferentes precipitações e no número de ocorrências, esta indica claramente a

⁶ O escoamento é modelado tendo em conta a influência do sistema de drenagem, o relevo e a permeabilidade do solo.

maior susceptibilidade nos pontos de descarga das linhas de água, com início no limite interior da frente ribeirinha, destacando-se ainda a área entre a Rib.^a de Alcântara e a Baixa, cujas bacias são as maiores e com um relevo mais acentuado (Figura 51).

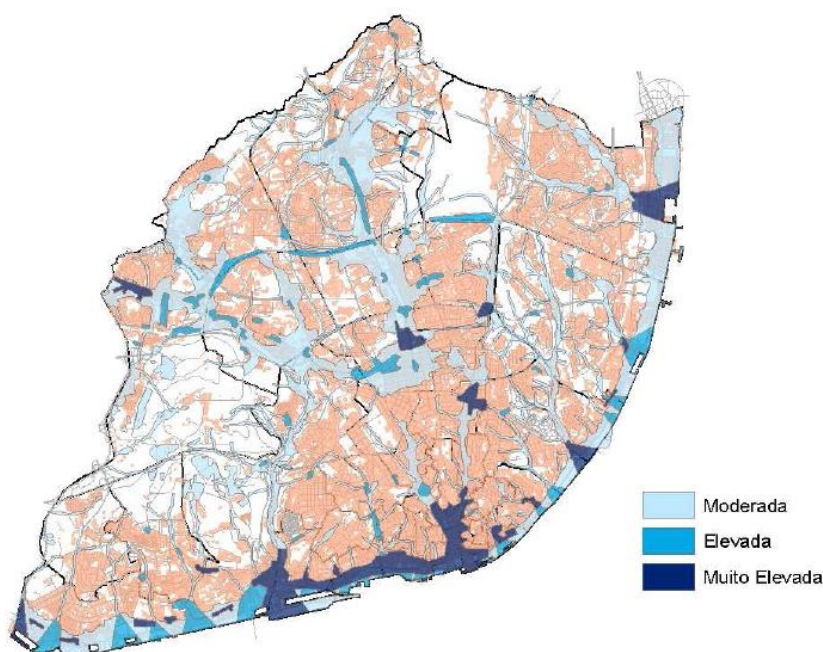


FIGURA 51. Carta de vulnerabilidade à inundação urbana no Concelho de Lisboa. Fonte: CML (2010).

De modo a compreender as limitações do actual sistema de drenagem e as suas consequências para a frente ribeirinha durante a ocorrência de precipitações extremas, e sem a pretensão de realizar uma análise extensiva, optou-se no presente trabalho por estudar as inundações de 18 de Fevereiro de 2008, 28 de Outubro de 2010 e 6 de Dezembro de 2012. Estes eventos são particularmente importantes por permitirem realizar um importante paralelo com a provável evolução das alterações climáticas e os futuros riscos para a frente ribeirinha, nomeadamente na área entre Alcântara e o Terreiro do Paço.

No dia 18 de Fevereiro de 2008 registou-se o máximo diário de precipitação desde o início do seu registo, com valores de 118mm (Instituto Geofísico) e 129mm (Gago Coutinho). A intensidade horária foi elevada mas não superou o máximo registado em 1983 (53mm/h), marcando os 30.0 mm na estação da Gago Coutinho e 35.3 mm no Instituto Geofísico entre as 04h e as 05h (Instituto de Meteorologia 2008). A precipitação foi considerada excepcional, com um período de retorno de 225 anos, não se enquadrando nos modelos climáticos de previsão existentes para Portugal. A intensidade da precipitação fez com que ocorressem inundações urbanas em diversos pontos da cidade, nomeadamente na Praça de Espanha, Sete Rios e Alcântara. A maré não foi um factor agravante, uma vez que durante o período de precipitação

esta encontrava-se em fase vazante, permitindo compreender que, mesmo sem obstrução na descarga costeira, o sistema de drenagem não se encontra dimensionado para a ocorrência de extremos. Para além da formação de lençóis de água em Alcântara, ocorreram estragos visíveis ao nível das condutas, revelando o excesso de pressão do escoamento nesta zona (Figura 52).



FIGURA 52. Danos em Alcântara após a precipitação de 18 de Fevereiro de 2008. Fonte: Lusa (2010).

As inundações de 28 de Outubro de 2010 e de 6 de Dezembro de 2012 diferem das de 2008 pela combinação com maré-alta (Lusa 2010; DN Portugal 2012). A precipitação de 2010 atingiu os 79mm/h (Instituto Geofísico), com um máximo horário de 32mm (Instituto de Meteorologia 2010). Apesar da precipitação acumulada ser muito inferior à de 2008, as consequências foram consideravelmente maiores, sobretudo na frente ribeirinha. A principal causa para a grande extensão e intensidade dos impactos deveu-se à coincidência da precipitação com a maré-alta e a uma ruptura de canalização no Martim Moniz, não permitindo que o escoamento costeiro funcionasse de forma eficiente. Os impactos fizeram-se sentir por toda a cidade, com alturas de água superiores a 1 metro nas zonas baixas de acumulação. As áreas mais afectadas foram a Baixa, Rossio, Restauradores, Av. da Liberdade e Alcântara, com uma forma muito semelhante à área de risco muito elevada entre Alcântara e o Terreiro do Paço (Figura 51). Para além dos fortes prejuízos em habitações, comércio, serviços, e no próprio espaço público, a circulação de transportes foi fortemente afectada, nomeadamente pelo alagamento e interrupção da rede de metro. A 6 de Dezembro de 2012 as inundações repetiram-se, mas com impactos inferiores às de 2010. A coincidência de precipitação intensa (91mm/24h na estação do Instituto Geofísico (IPMA 2012)) com preia-mar implicou inundações em toda a cidade, com início em Alcântara, Alvito e Olivais (DN Portugal 2012). O facto de a intensidade de precipitação (30mm/3h) e a maré não serem particularmente elevadas, assim como a ausência de rupturas, permitiu que a extensão do evento fosse menor que a de 2010.

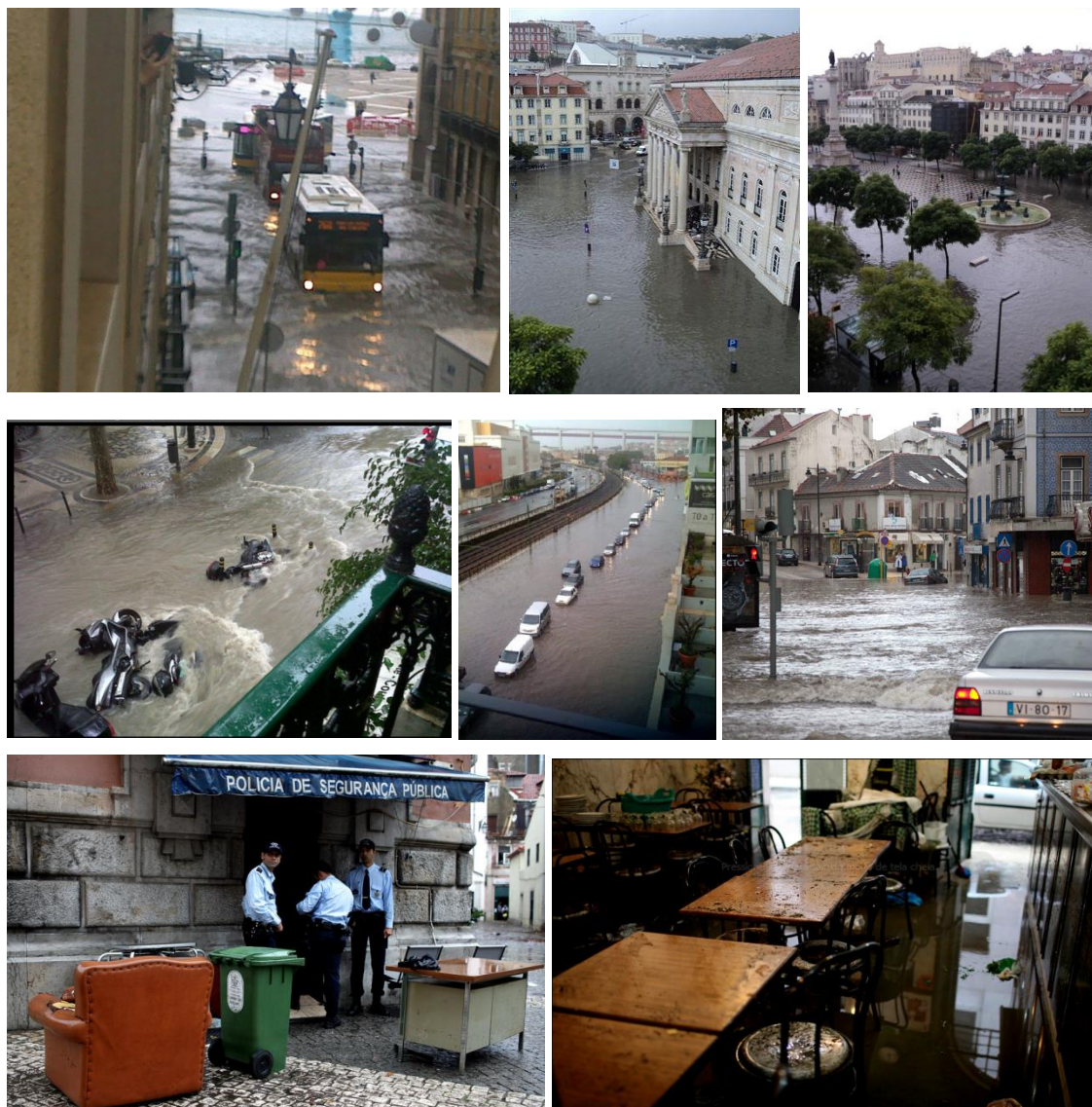


FIGURA 53. Acumulação de água em diversas zonas baixas e danos nas diversas actividades durante as inundações de 28 de Outubro de 2010. Fontes: Expresso e EU Reporter.

O estudo destes três episódios permite retirar algumas ilações sobre a sensibilidade do sistema de drenagem e as suas implicações para a frente ribeirinha no contexto das alterações climáticas. Como seria previsível, durante a ocorrência de fenómenos intensos, o sistema de drenagem não tem capacidade de absorção e de escoamento costeiro suficiente, dando origem ao encaminhamento superficial da água e ao seu transbordo nas zonas baixas. Uma vez que os fenómenos extremos de precipitação tenderão a ser mais intensos e frequentes no futuro, pode-se considerar que o sistema de drenagem se encontrará cada vez mais subdimensionado. Embora todos os eventos apresentados tenham sido muito intensos, especialmente o de 2008, a principal diferença reside na obstrução dos pontos de descarga, pelo efeito tampão do estuário. A precipitação de 2010, cujo total foi menor que a de 2012 e 2008, deu origem a inundações urbanas muito graves, especialmente na frente ribeirinha e zonas baixas, acumulando grandes alturas nas zonas baixas e aplanadas. A precipitação de 2012, não sendo especialmente

intensa, apesar do valor acumulado diário constituir um novo máximo para o mês de Dezembro, também deu origem a inundações na frente ribeirinha devido à maré, indicando a dependência costeira do sistema de drenagem, mesmo para intensidades mais baixas. Encontrando-se a frente ribeirinha exposta à futura subida do nível do mar, podemos-nos questionar se o sistema poderá continuar a depender do escoamento costeiro.

3.4. O risco de inundação urbana na frente ribeirinha em cenários de alterações climáticas

A caracterização da sensibilidade do risco de inundação na frente ribeirinha, através da relação existente entre os extremos de precipitação, o nível de água do estuário e o sistema de drenagem, permite prever a sua provável evolução em cenários de alterações climáticas. Desta forma, analisam-se seguidamente as alterações nos extremos de precipitação e no nível do mar para Lisboa, de modo a compreender como estes podem afectar o sistema de drenagem e aumentar a frequência e/ou extensão dos impactos das inundações urbanas na frente ribeirinha.

3.4.1. Os extremos de precipitação e as alterações climáticas

Tal como já referido no capítulo 1, as projecções climáticas indicam uma descida substancial na quantidade de precipitação anual em Portugal para o final do século XXI, com reduções de cerca de 30 a 40%. O estudo realizado para Cascais, pelo CCIAM, indica uma diminuição da precipitação em todos os meses e para todos os cenários de emissões, à excepção do B2 (Figura 64). Uma vez que as actuais emissões estão mais próximas dos piores cenários do que dos melhores, a sua forte diminuição pode ser dada como a mais provável. A diminuição da precipitação implica um menor número de cheias (dias consecutivos com chuva), mas os modelos e os princípios físicos apontam com segurança para um aumento da intensidade diária, em cerca de 10 a 20%, e uma diminuição dos períodos de retorno dos eventos extremos em todos os cenários (PECAC 2010; IPCC 2012; EEA 2012a).

Desta forma, o sistema de drenagem de Lisboa ficará progressivamente subdimensionado, tendo de lidar com precipitações mais espaçadas no tempo, mas também mais intensas e localizadas, agravando os possíveis impactos das inundações na frente ribeirinha de forma semelhante aos três eventos anteriormente apresentados.

Precipitação acumulada (mm)

	actual	meados do séc. XXI				finais do séc. XXI			
		A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2
Janeiro	95	-1	-5	-5	4	-2	-10	-10	8
Fevereiro	71	0	-2	0	-1	0	-3	0	-2
Março	99	-2	-16	1	15	-4	-32	1	29
Abril	55	-13	-14	-8	-6	-26	-27	-16	-11
Maio	35	-10	-11	-7	-6	-20	-23	-14	-11
Junho	16	-4	-5	-3	-3	-8	-9	-6	-6
Julho	4	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2
Agosto	5	-2	-2	-1	-1	-3	-3	-2	-3
Setembro	30	-7	-5	-3	-4	-13	-10	-7	-8
Outubro	56	-16	-10	-7	-3	-32	-20	-13	-6
Novembro	85	-16	-18	-21	-10	-32	-35	-42	-19
Dezembro	77	-12	-15	-15	-9	-24	-30	-30	-17
Anual	628	-7	-8	-6	-2	-14	-17	-12	-4

FIGURA 54. Precipitação acumulada média mensal em Cascais no início do século XXI e projectada para o final do século XXI. Fonte: PECAC (2010).

As observações ao longo de todo o século XX não apontam mudanças significativas nos extremos de precipitação (Westra et al. 2012). No entanto, a ocorrência de eventos extremos de precipitação em Lisboa é muito dependente da influência regional das oscilações oceânicas, sendo os valores de precipitação mensal e diária muito superiores quando o índice NAO se encontra negativo, tal como tem ocorrido na última década e entre 1930-1970 (Santos et al. 2006). A influência das alterações climáticas sobre este índice não é evidente, sendo necessário acompanhar o seu estudo para compreender se existe alguma alteração relevante no seu padrão, mas a sua recente mudança de sinal pode implicar um novo período de precipitações intensas, aumentando fortemente o risco de inundação urbana na frente ribeirinha.

3.4.2. Nível do mar local e as alterações climáticas

O nível médio do mar em Lisboa depende das variações globais da SNMM e da sua distribuição regional, assim como dos movimentos verticais. Actualmente, a subida do nível do mar já decorrida em Lisboa corresponde a um aumento de 23 cm em relação a 1938, sendo que 16 cm são consequência da subida global do nível do mar e 7 cm das oscilações oceânicas (valor reversível e dependente do índice NAO) (Antunes 2011a). Considerando as projecções Dutch Delta Committee (Katsman et al. 2011), National Research Council (NRC 2012) e do United States National Climate Assessment (Parris, Bromirski et al. 2012) como as mais fiáveis e de acordo com as tendências actuais, a subida global do nível do mar pode corresponder a um aumento de 0.18 a 0.42m para 2050 e de 0.50 a 1.40 m para 2100, tendo em atenção que os valores médios dos intervalos são os mais prováveis (ver Anexo 1). A sua expressão local em

Lisboa poderá significar cerca de menos 0.10m em 2100, ou seja, uma variação de 0.40 a 1.30m, devido a diferenças na distribuição regional (ver Anexo 2).

O nível do mar do estuário é ainda influenciado por outros factores, podendo a sua combinação dar origem a importantes subidas no nível do estuário (Figura 65 e Tabela 3 – Anexo 2). A influência fluvial do rio Tejo é actualmente controlada pelas barragens a montante e minimizada pela abertura do estuário, devendo a sua contribuição futura diminuir devido ao registo de menores precipitações mensais. Como não se prevê nenhuma alteração significativa em nenhum dos outros factores (ondulação, sobrelevação, marés e circulação oceânica), pode-se considerar que os seus valores máximos e a sua probabilidade de ocorrência serão mantidos de forma semelhante à actual, sendo a única variação expressiva a subida do nível do mar.



FIGURA 55. Esquema dos diversos factores de influência no nível de maré do estuário (ver Tabela 3 – Anexo 2). Valor do nível do mar para 2100. Fonte: Autor.

3.4.3. A drenagem e o risco de inundação urbana na frente ribeirinha em cenários de alterações climáticas

No contexto das alterações climáticas, o risco de inundação urbana na frente ribeirinha deverá ser agravado pelo aumento do número e intensidade dos fenómenos de precipitação extrema e

pela progressiva obstrução do nível do mar do estuário. Uma vez que o actual sistema de drenagem já se encontra subdimensionado para os eventos mais intensos de precipitação, e de forma agravada na coincidência com preia-mar, pode-se concluir que a simultânea subida do nível do mar e da intensidade da chuva contribuirá para um provável aumento do número de eventos, da área afectada e consequentemente, dos impactos das inundações na frente ribeirinha, nomeadamente nas áreas mais susceptíveis, ou seja, nos pontos de descarga dos vales e no troço entre a Rib.^a de Alcântara e o Terreiro do Paço.

O aumento da intensidade de precipitação implicará caudais cada vez maiores e tempos de concentração cada vez menores na foz dos vales, dependendo o seu escoamento da emissão costeira. No entanto, devido à subida do nível do mar, o escoamento costeiro será cada vez mais difícil devido ao aumento da probabilidade de coincidência de precipitação com um nível de mar cada vez mais alto, aumentando a duração das inundações e consequentemente a quantidade de água acumulada nas zonas baixas (Figura 56). Actualmente, na ocorrência de marés altas, o nível da água já atinge a cota costeira da frente ribeirinha (Figura 57), pelo que qualquer subida irá certamente aumentar o efeito tampão do estuário e a probabilidade de inundação urbana, obrigando a questionar como poderá a drenagem da cidade processar-se para uma SNMM média de 70 a 80 cm, considerando que devido ao relevo aplanado da frente ribeirinha, os emissários costeiros não se podem localizar a cotas superiores, ficando cada vez mais sujeitos aos efeitos de maré e à intrusão de água nas tubagens.

As inundações de 2008, 2010 e 2012 podem assim ilustrar o tipo de eventos que poderão passar a ocorrer com maior frequência em alterações climáticas, sendo a de 2008 associável aos fenómenos extremos de precipitação, e as de 2010 e 2012 ao aumento de coincidência de precipitação com níveis de mar cada vez mais altos. Desta forma, o risco de inundação apresentado na carta de vulnerabilidades (Figura 51) tenderá a ser uma realidade cada vez mais frequente, podendo inclusivamente expandir-se para áreas cada vez mais interiores, sobretudo ao longo das linhas de água, como no caso da Ribeira de Alcântara ou da Baixa Pombalina, uma vez que as sobrecargas no sistema de drenagem da frente ribeirinha têm efeitos na capacidade de escoamento a montante.

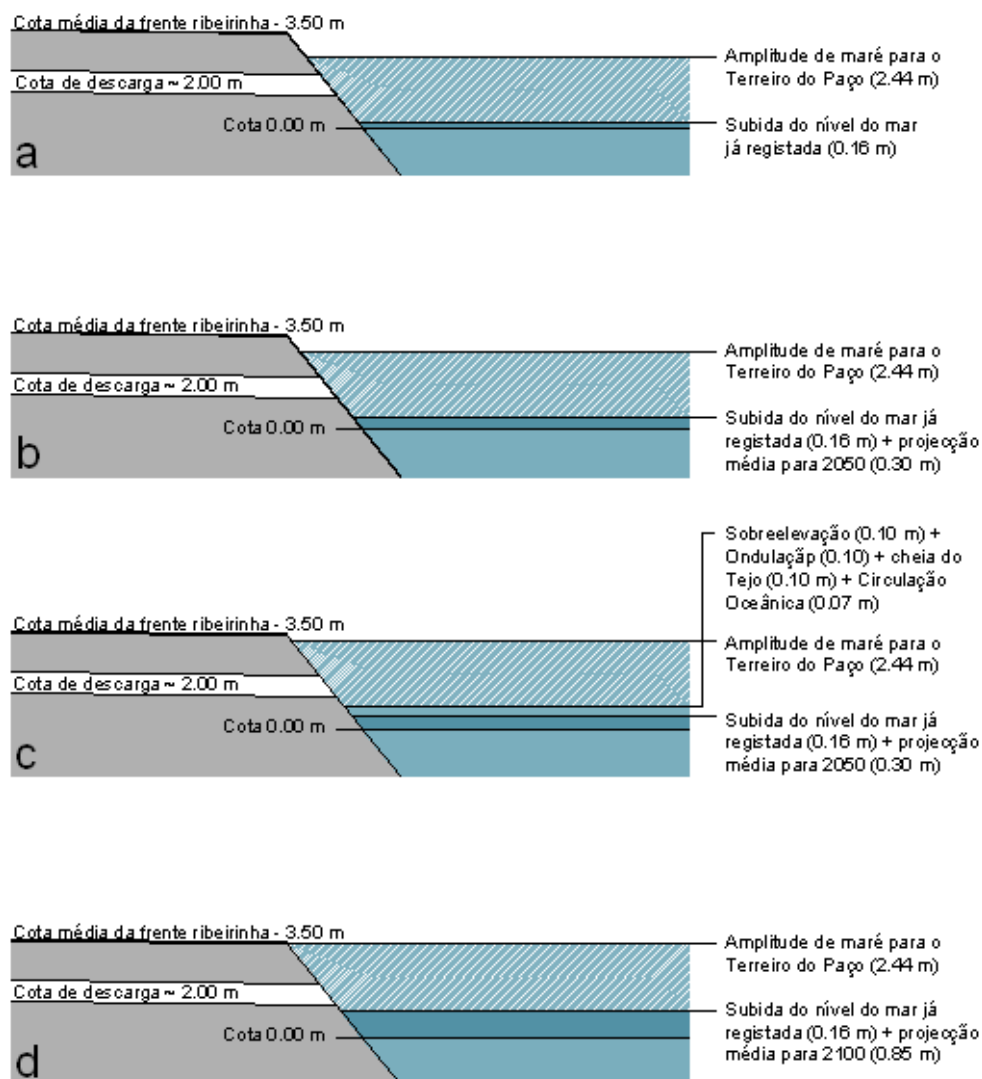


FIGURA 56. Esquema da relação entre a amplitude de maré, a frente ribeirinha de Lisboa e a projecção da subida do nível do mar local para 2050 e 2100. Fonte: Autor.

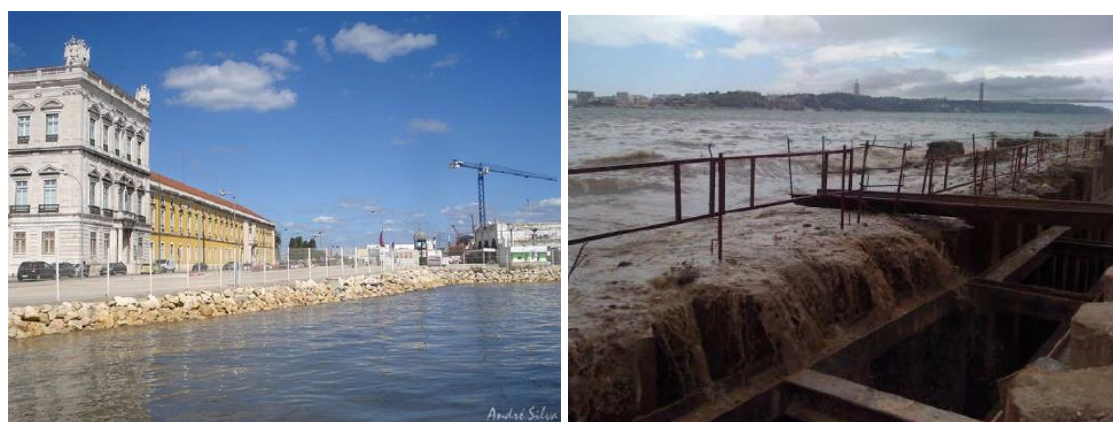


FIGURA 57. Maré-alta no Terreiro do Paço em tempo limpo e durante temporal (dir.). Fonte: André Silva e Martins (2012), respectivamente.

Compreendido o actual risco de inundação da frente ribeirinha, os principais factores de mudança devido às alterações climáticas e o funcionamento do sistema de drenagem em Lisboa, podemos-nos questionar se a manutenção dos mesmos princípios de escoamento poderá continuar a ser a melhor resposta para a drenagem da cidade. A aposta num escoamento essencialmente gravítico a montante implicará sempre maiores quantidades de água a jusante, cuja drenagem estará cada vez mais dificultada pelo aumento do nível do mar do estuário. Por sua vez, o confinamento do escoamento da frente ribeirinha a tubagens no subsolo não permite a flexibilidade necessária nos momentos críticos, propagando as inundações ao longo das linhas de água e repercutindo as suas consequências para todo o sistema de drenagem a montante. Se para precipitações e um nível do mar estável o escoamento directo e confinado pode ser uma hipótese viável, apesar do risco já existente, no futuro clima o sistema de drenagem terá de possuir uma maior flexibilidade para fazer face a intensidades crescentes e a um escoamento cada vez mais difícil. Nesta  ptica, a melhoria do escoamento nos pontos de descarga e a retenção da água a montante representam uma possível mudança nos princípios de drenagem da cidade, aumentando a flexibilidade de todo o sistema e a diminuição dos impactos das inundações urbanas na frente ribeirinha e na cidade no médio e longo prazo. Independentemente do tipo de medidas a adoptar, se mais ‘cinzentas’ ou ‘verdes’, a continuação da aposta no rápido escoamento e no total confinamento da drenagem   contrária aos princípios necessários para responder aos futuros processos climáticos.

CONCLUSÃO

As alterações climáticas implicam importantes alterações no risco de inundação das frentes de água urbanizadas de deltas e estuários, constituindo uma ameaça para a manutenção e o desenvolvimento de vastas áreas urbanas. Embora dependente do contexto de cada local, o aumento da precipitação intensa e da subida do nível do mar obriga a importantes mudanças na forma como a drenagem das águas pluviais poderá ser realizada no futuro. A dimensão das alterações e a particular sensibilidade das frentes de água, coloca em causa a dependência depositada na eficiência da infraestrutura de drenagem ao longo do último século para a resolução do escoamento hidrológico das cidades, obrigando o meio urbano a adaptar-se aos futuros processos. Esta nova equação implica uma importante mudança de atitude na forma como a drenagem urbana dos deltas e estuários é realizada. Subidas do nível do mar de 80cm ou o aumento das precipitações intensas em percentagens consideráveis têm uma importante influência na expansão e frequência do risco de inundação destes territórios, obrigando a repensar as formas como estes territórios realizam a sua drenagem.

Para se adaptarem a estas alterações, as cidades de delta e estuário iniciaram a modificação ou o reforço da alteração do paradigma de descarga rápida para a atenuação dos caudais ponta (através da retenção a montante) e do confinamento dos pontos de descarga para formas de escoamento mais flexíveis e eficazes. No entanto, a dificuldade de alteração da cidade consolidada e das suas infraestruturas de drenagem, relevou igualmente a necessidade de preparação do meio urbano para a acomodação das inundações, cujos impactos podem ser fortemente reduzidos pelo aumento da sua resiliência, através da diminuição das vulnerabilidades e da melhoria da sua recuperação.

Independentemente do(s) tipo(s) de resposta(s) das estratégia de adaptação, numa perspectiva geral, as frentes de água dos deltas e estuários terão de se adaptar aos novos processos na óptica de minimizar os impactos em áreas críticas das cidades e de evitar a sua expansão para área cada vez mais interiores. Mas se as inundações urbanas são um problema já existente e amplamente debatido, sobretudo devido à difícil compatibilização da drenagem com a crescente expansão e impermeabilização do solo, em alterações climáticas e nas frentes de água elas ganham novas especificidades. A dimensão e velocidade das alterações, assim como os seus impactos, implicam a procura de respostas mais urgentes e robustas, capazes de minimizar as piores consequências em tempo útil, obrigando a uma compreensão dos possíveis cenários e à transposição de estratégias para a prática da gestão urbana e do território que permitam realizar

os ajustamentos necessários aos novos processos. Focando nas respostas de adaptação das frentes de água que visam o controlo das inundações, a percepção de que a velocidade das alterações não é compatível com a rigidez temporal das infraestruturas de drenagem levou muitas cidades à procura de soluções alternativas que permitissem atenuar os maiores impactos. Esta equação faz renascer a importância da (re)leitura hidrológica da paisagem urbana, “quase” esquecida pela extrema eficiência e especialização dos sistemas de drenagem artificiais. Nesta perspectiva, as soluções de atenuação dos caudais e de melhoria do escoamento, mais ou menos artificiais, inovadoras ou já conhecidas, ganham uma nova relevância nos presentes e futuros desafios dos deltas e estuários e, ao mesmo tempo, levantam a questão sobre a melhor forma de compatibilizar a ocupação urbana consolidada com os novos problemas de drenagem. A compreensão de que edifícios, praças, parques, estradas, estruturas verdes ou linhas de água têm um vasto potencial para lidar com o problema, assim como uma flexibilidade de integração no meio urbano superior à da infraestrutura artificial, implica que o planeamento e o desenho urbano se religuem a uma estratégia hidrológica mais vasta e multifacetada. As soluções baseadas na construção de uma infraestrutura verde ou azul no meio urbano, possuem ainda uma maior facilidade de lidar com os cenários de incerteza das alterações climáticas, podendo ser incrementalmente integradas no meio urbano sem a necessidade de recorrer exclusivamente a reformulações tão definitivas, extensivas e dispendiosas como as dos sistemas artificiais de drenagem. Esta flexibilidade temporal é particularmente importante para os deltas e estuários, uma vez que a velocidade das alterações climáticas pode inviabilizar os horizontes temporais das medidas baseadas na drenagem ‘tradicional’. Desta forma, a integração de estratégias hidrológicas no desenho e no planeamento urbano dos deltas e estuários assume uma particular relevância e urgência, uma vez que os futuros problemas de escoamento não podem simplesmente remeter a sua solução para dependência dos sistemas artificiais.

Neste sentido, a configuração da drenagem urbana tem de ter a abertura necessária para a compreensão das suas limitações de actuação nos deltas e estuários, e para a urgência de expansão das diferentes formas e capacidades de modelar o escoamento. As barreiras para a harmonização de práticas são diversas, tais como a normalização técnica de soluções alternativas, a percepção da necessidade de actuação no presente para a atenuação dos impactos no médio e longo prazo, a dificuldade de actuação coordenada nas diferentes fronteiras da água, ou a integração de soluções nos processos de urbanização. No entanto, a compatibilização de diferentes práticas e escalas de actuação num mesmo sentido, é tanto mais urgente quanto maior for o grau das alterações climáticas. Nesta óptica, as medidas baseadas na integração de uma infraestrutura verde ou azul no meio urbano, têm de conseguir demonstrar a sua viabilidade e relevância em cada contexto, não se podendo restringir a meras recomendações ou intervenções pontuais. A sua quantificação enquanto sistema de drenagem alternativo, complementar ou redundante, constitui uma prioridade para a equiparação com as soluções baseadas na infraestrutura ‘cinzenta’. A imaginação de diferentes soluções, ao nível de edifícios, áreas pavimentadas ou espaços verdes, assim como as especificidades técnicas da sua construção, constituem um campo de investigação e aplicação cada vez mais importante

para a atenuação dos sensíveis e urgentes problemas de drenagem urbana dos deltas e estuários. Não sendo o meio urbano um problema exclusivamente hidrológico, mesmo face ao risco de inundação das frentes de água, o estudo da integração de soluções de drenagem urbana baseadas em processos ecológicos e sensíveis à água e a sua conexão com o planeamento e o desenho urbano de cada contexto, constitui um campo de inovação igualmente importante e um desafio a desenvolver em cada local.

Transpondo para o problema das inundações urbanas da frente ribeirinha de Lisboa, o presente trabalho pretendeu demonstrar a inevitabilidade da reformulação do sistema de drenagem no contexto das alterações climáticas. Embora o aumento da intensidade de precipitação não seja evidente, o subdimensionamento do sistema de drenagem é já uma realidade presente para eventos acima dos 40 a 50 mm/dia, com importantes consequências na ocorrência de inundações. Com menos dúvidas quanto à sua evolução, apesar dos horizontes temporais serem ainda algo incertos, a SNMM deverá agravar o risco de inundação de Lisboa, com impactos nas frentes de água e zonas baixas, assim como nas áreas ao longo das linhas de água e que dependem da fluidez do escoamento costeiro. Desta forma, será necessário imaginar como pode a cidade adaptar a sua drenagem para subidas do NMM de 50 cm, 1,00m ou 1,50 m, independentemente de estas ocorrerem uma ou duas décadas antes ou depois do previsto. Sendo o actual sistema de drenagem muito dependente da descarga rápida e da emissão costeira confinada, urge compreender quais as possibilidades e vantagens da alteração dos princípios de drenagem.

Neste sentido, o planeamento hidrológico do escoamento bacia-a-bacia, de uma forma concreta e quantificável para diferentes horizontes temporais, transversal aos diversos tipos de intervenientes e ocupações urbanas, pode constituir uma importante ferramenta de adaptação para o caso de Lisboa. No entanto, muitas questões podem ser levantadas em relação a definição de possíveis estratégias para a cidade. Qual o potencial da infraestrutura verde e do espaço público para atenuar o escoamento? Podem os edifícios captar importantes volumes de água, considerando a sua integração nos tempos de renovação urbana? A abertura de linhas de água pode resolver alguns dos problemas mais críticos das inundações na frente de água? Qual a influência das futuras construções a montante nas inundações da frente ribeirinha? Tem a cidade tempo de evitar os piores impactos? Devem as estratégias de adaptação basear-se mais na redução das inundações ou no aumento da resiliência? Como imaginar a drenagem para eventuais grandes subidas do nível do mar? Quais as possibilidades da cidade refazer a sua infraestrutura artificial de drenagem? Deve a frente ribeirinha ser repensada para ocupações diferentes das actuais face à inevitável SNMM e à frequência das inundações urbanas? Que oportunidades de renovação da cidade podem ligar-se a soluções de drenagem alternativas?

Estas e muitas outras questões podem ser colocadas e estudadas ao nível da necessária intercepção do planeamento urbano com os problemas de drenagem. A minimização dos impactos das alterações climáticas assim o exige, se quisermos tomar algumas decisões antes que estas sejam tomadas por nós. No desafio que constitui a adaptação às alterações climáticas

nos deltas e estuários, o planeamento de paisagens urbanas mais sensíveis aos problemas da água constitui uma prioridade, reforçando a importância da prática espacial no necessário reequilíbrio das realidades urbanas com os diversos benefícios dos sistemas naturais.

BIBLIOGRAFIA

Alcoforado, M. J., H. Andrade, S. Oliveira, et al. (2009). Alterações Climáticas e Desenvolvimento Urbano. Lisboa, DGOTDU.

Allan, R. P. (2011). "Climate change: Human influence on rainfall." NATURE - letter research **470**(7334): 2 pp.

Antunes, C. (2009). "Sea Level at Cascais Tide Gauge: Data, Analysis and Results." Journal of Coastal Research(56): 218-222.

Antunes, C. (2010). Monitorização da variação do Nível Médio do Mar. 1ª Jornada de engenharia Hidrogeográfica. Lisboa: pp. 4.

Antunes, C. (2011a). "Monitoring sea level change at Cascais tide gauge." Journal of Coastal Research **64**(Special Issue): 870-874.

Antunes, C. (2011b). Variação actual do NMM em Cascais. VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia. Porto.

Antunes, C. (2012a). "Glossário de Marés." Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal. Retrieved 14 December, 2012, from http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_termos.html.

Antunes, C. (2012b). Variação do Nível do Mar em Cascais. IV Jornadas – Engenharia Geográfica IPG- 2012, Cascais.

APL (2012). Tabela de Marés Lisboa 2012, Instituto Hidrográfico.

AVISO (2012). "Mean Sea Level rise." Retrieved 9 January 2012, from <http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/ocean-indicators/mean-sea-level/>.

Boer, F. (2012). Designing WATER RESILIENT CITIES. Water & the City. T.U. Delft.

Bruijn, K. d., F. Klijn, A. Ölfert, et al. (2009). Flood risk assessment and flood risk management - An introduction and guidance based on experiences and findings of FLOODsite (an EU-funded Integrated Project), FLOODsite Consortium.

Catalão, J. (2012). Utilização de dados InSAR para estudos de subsidência em áreas urbanas. Porto.

CCDR-LVT (2007). Boas Práticas para Ocupação do Solo, no respeito pelos Recursos Hídricos - Corredores Ribeirinhos e Controlo de Cheias e de Áreas Inundadas em Pequenas Bacias Hidrográficas, CCDR-LVT.

Church, J. e N. White (2011) Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. Surv Geophys **32**, 585-602 DOI: 10.1007/s10712-011-9119-1

City of Copenhagen (2011). COPENHAGEN CLIMATE ADAPTATION PLAN Copenhagen, City of Copenhagen.

CML (2009). Relatório do Estado do Ordenamento do Território REOT. Lisboa, Câmara Municipal de Lisboa 257-271.

CML (2010). Relatório síntese de Caracterização Biofísica de Lisboa no âmbito da Revisão do Plano Director Municipal de Lisboa Lisboa, CML.

CML (2011). Condicionantes de infraestruturas. Lisboa, CML.

CML (2012). Estrutura Ecológica Municipal. Plano Director Municipal. Lisboa, CML.

CML (2012). Plano Director Municipal de Lisboa – Relatório de Caracterização Síntese. Lisboa, Câmara Municipal de Lisboa.

Costa, J. P. (2011). 'Climate Proof Cities'. Urbanismo e a Adaptação às Alterações Climáticas. As frentes de água. Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa.

Costa, J. P. (2011). 'Climate Proof Cities'. Urbanismo e a Adaptação às Alterações Climáticas. As frentes de água. Lição de Agregação em Urbanismo apresentada na FA-UTL. Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa. **2**.

Costa, J. P. e M. M. Silva (2012). Climate Change Adaptation and Urbanism -
Contributes to the study of the Lisbon Case.

CSIRO (2011, 9 March). "Sea Level Rise." Retrieved 18 December, 2012, from
<http://www.cmar.csiro.au/sealevel/>.

CU (2013, 21 de Janeiro de 2013). "2013_rel1: Global Mean Sea Level Time
Series (seasonal signals removed)." CU Sea Level Research Group. Retrieved
20 Fevereiro, 2013, from <http://sealevel.colorado.edu/>.

DE URBANISTEN (2013). "DE URBANISTEN." Retrieved Março, 2013, from
<http://www.urbanisten.nl>.

DEFRA e UK Climate Projections (2012, 30 April 2012). "Marine & coastal Sea
level rise projections." from <http://ukclimateprojections.defra.gov.uk/22568>.

Deltacommissie (2008). Working together with water - A living land builds for its
future. Wilfried ten Brinke: 138 pp.

DN Portugal (2012) Mau tempo obrigou Sapadores a mais de 150 intervenções.
Diário de Notícias

Dreiseitl, H. (2007). New Waterscapes for Singapore. Topos. Germany.

EEA (2011). Green infrastructure and territorial cohesion Copenhagen, European
Environment Agency.

EEA (2012a). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012.
Denmark, European Environment Agency: 300 pp.

EEA (2012b). Urban adaptation to climate change in Europe Copenhagen,
European Environment Agency 143 pp.

EPA (2013, 11 Janeiro 2013). "Water: Green Infrastructure." Retrieved Julho
2013, 2013, from
http://water.epa.gov/infrastructure/greeninfrastructure/gi_what.cfm.

FCUL. "Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal." Retrieved 7 de
Dezembro de 2012, 2012, from
http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_tabelas.html.

Gersonius, B., R. Ashley, A. Pathirana, et al. (2013). "Climate change uncertainty: building flexibility into water and flood risk infrastructure." Climatic Change **116**(2): 411-423.

Gersonius, B., C. Zevenbergen e S. Herk (2008). Managing flood risk in the urban environment: linking spatial planning, risk assessment, communication and policy. Adaptive and Integrated Water Management. C. Pahl-Wostl, P. Kabat and J. Möltgen, Springer Berlin Heidelberg: 263-275.

Grinsted, A., J. C. Moore e S. Jevrejeva (2009). "Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD." Climate Dynamics **34**: 461-472.

Hellmer, H. H., F. Kauker, R. Timmermann, et al. (2012). "Twenty-first-century warming of a large Antarctic ice-shelf cavity by a redirected coastal current." Nature **485**(7397): 225-228.

Horton, R., C. Herweijer, C. Rosenzweig, et al. (2008). "Sea level rise projections for current generation CGCMs based on the semi-empirical method." Geophys. Res. Lett. **35**(2): L02715.

Instituto de Meteorologia (2008). Cheias de 18 de Fevereiro de 2008, Instituto de Meteorologia.

Instituto de Meteorologia (2010). Boletim Climatológico Anual - Ano 2010 Lisboa, Instituto de Meteorologia.

Intemper (2013). 2013, from <http://www.intemper.com/portugal/origen.htm>.

IPCC (2000). Emissions Cenarios - Summary for Policymakers. IPCC SPECIAL REPORT EMISSIONS SCENARIOS.

IPCC (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P. J. v. d. Linden and C. E. Hanson. Cambridge, UK, Intergovernmental Panel on Climate Change: 976pp.

IPCC (2007a). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Cambridge,

United Kingdom and New York, USA, Intergovernmental Panel on Climate Change: 996 pp.

IPCC (2007c). Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave and L. A. Meyer. Cambridge, United Kingdom and New York, USA, Intergovernmental Panel on Climate Change: 849 pp.

IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker et al. Cambridge, UK, New York, USA, IPCC: 582 pp.

IPMA (2012). Boletim climatológico mensal – dezembro 2012 Instituto Português do Mar e da Atmosfera.

Jacob, T., J. Wahr, W. Pfeffer, et al. (2012). "Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise." Nature **482**(7386): 514-518.

Jevrejeva, S., J. C. Moore e A. Grinsted (2010). "How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100?" Geophysical Research Letters **37**(L07703).

Katsman, C. A., A. Sterl, J. J. Beersma, et al. (2011). "Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta—the Netherlands as an example." Climatic Change **109**: 617-645.

Kopp, R. E., F. J. Simons, J. X. Mitrovica, et al. (2009). "Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage." Nature **462**: 863-867.

Lambeck, K., M. Anzidei, F. Antonioli, et al. (2004). "Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for recent change." Earth and Planetary Science Letters **223**: 563–575.

Landerer, F. W. (2013). The anatomy of recent large sea level fluctuations in the Mediterranean Sea.

Lusa (2010) Chuva inunda Lisboa e Proteção Civil estende alerta a 14 distritos. Expresso

Marcos, M. e M. N. Tsimplis (2008). "Coastal sea level trends in Southern Europe." Geophys. J. Int. **175**: 70-82.

Margolis, L. e A. Robinson (2007). Living Systems, Birkhäuser.

Martins, J. (2012). O caso da frente ribeirinha de Lisboa.

Matos, R. S. (2008). Soluções de controlo na origem de águas pluviais.

Meinshausen, M., S. J. Smith, K. Calvin, et al. (2011). "The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300." Climatic Change **109**(1-2): 213-241.

Meyssignac, B. e A. Cazenave (2012). "Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability." Journal of Geodynamics **58**(0): 96-109.

Min, S.-K., X. Zhang, F. W. Zwiers, et al. (2011). "Human contribution to more-intense precipitation extremes." NATURE - letter research **470**(7334): 4 pp.

Most, H. v. d., M. Marchand, T. Bucx, et al. (2009). Towards sustainable development of deltas, estuaries and coastal zones - Trends and responses. Holanda, Deltares: 100 pp.

Municipality of Rotterdam (2007). Waterplan 2 Rotterdam. Roterdão.

Nicholls, R. J., S. Hanson, J. A. Lowe, et al. (2011). Constructing sea-level scenarios for impact and adaptation assessment of coastal areas: a guidance document, Intergovernmental Panel on Climate Change - Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis: 47 pp.

NOAA (2013). "Storm Surge & Coastal Floods." Retrieved 19 Fevereiro, 2013, from http://www.noaawatch.gov/themes/coastal_inundation.php.

NOAA (2013, 11 de Maio de 2012). "Storm Surge Overview." Retrieved Abril, 2013, from <http://www.nhc.noaa.gov/surge/>.

NRC (2012). Sea-Level Rise for the Coasts of California, Oregon, and Washington: Past, Present, and Future. Report in Brief.

Oliveira, P. E. (2005). Inundações na Cidade de Lisboa: Implicações da Melhoria do Sistema de Drenagem Artificial após os anos 60. X Colóquio Ibérico de Geografia - A Geografia Ibérica no Contexto Europeu. Universidade de Évora.

Oliveira, P. E. e C. Ramos (2002). "Inundações na cidade de Lisboa durante o século XX e seus factores agravantes." Finisterra **XXXVII**(74).

Parris, A., P. Bromirski, V. Burkett, et al. (2012). Global Sea Level Rise Scenarios for the United States National Climate Assessment. Silver Spring, MD, NOAA/OAR: 37 pp.

PECAC (2010). Plano Estratégico de Cascais face às Alterações Climáticas. F. D. Santos and M. J. Cruz. Cascais, CCIAM/SIM, FCUL e Câmara Municipal de Cascais.

pedrodepinto (2007). Memórias de Lisboa. SkyscraperCity. **2012**.

Peel, C. (2009) Facing up to Rising Sea-Levels: RETREAT? DEFEND? ATTACK? 15

Perrette, M., F. Landerer, R. Riva, et al. (2012). Probabilistic projection of sea-level change along the world's coastlines. Earth System Dynamics Discussions, Copernicus Publications. **3**: 357-389.

Peters, G. P., R. M. Andrew, T. Boden, et al. (2013). "The challenge to keep global warming below 2 °C." Nature Clim. Change **3**(1): 3.

Pfeffer, W. T., J. T. Harper e S. O'Neel (2008). "Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise." Science **321**(5894): 1340-1343.

plaNYC (2011). A greener, greater New York. New York, USA, The City of New York: 200pp.

Rahmstorf, S. (2007). A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. Science. **315**: 368-370.

Rahmstorf, S. e D. Coumou (2012) A decade of weather extremes. 6 DOI: 10.1038/NCLIMATE1452

Rahmstorf, S., A. Foster e A. Cazenave (2012). "Comparing climate projections to observations up to 2011." Environmental Research Letters **7**: 5pp.

Ramos, C. (2001). As cheias no sul de Portugal em diferentes tipos de bacias hidrográficas. Finisterra. **XXXVI**: 61-82.

Ramos, C. (2007). Cheias e Inundações: factores desencadeantes e agravantes e medidas mitigadoras. 2º Ciclo de Debates à Volta do Ambiente, Cheias – os seus ciclos e prevenção, Loures.

Reeder, T. (2011). TE2100 Flexible Planning in the Thames Estuary. Bonn, Germany.

Rijke, J., W. Veerbeek, C. Zevenbergen, et al. (2010). Adapting where we can, instead of where we have to. Rotterdam, TU Delft Flood Resilience Group - International Conference Deltas in Time of Climate Change

Robinson, A., R. Calov e A. Ganopolski (2012). "Multistability and critical thresholds of the Greenland ice sheet." Nature Clim. Change **2**(6): 429-432.

Rohling, E. J., K. Grant, C. Hemleben, et al. (2008). "High rates of sea-level rise during the last interglacial period." Nature Geoscience **1**(Letters): 38-42.

Santos, F. D. (2006). Problemática das Alterações Climáticas no Início do Século XXI. Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e medidas de Adaptação. Projecto SIAM II. F. D. Santos and P. Miranda. Lisboa.

Santos, F. D. e P. Miranda (2006). Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II. Lisboa, SIAM: 505 pp.

Saraiva, G. (1999). O Rio como Paisagem - Gestão de Corredores Fluviais no Quadro do Ordenamento do Território. Lisboa, FCT/FCG.

Shepherd, A., E. R. Ivins, A. Geruo, et al. (2012). A Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance. Science. **338**: 1183-1189.

Shiu, C.-J., S. C. Liu, C. Fu, et al. (2012). "How much do precipitation extremes change in a warming climate?" Geophys. Res. Lett.

Silva, M. M. (2011). EL MODELO BARCELONA DE ESPACIO PÚBLICO Y DISEÑO URBANO: Public Space and Flood Management | Dipòsits d'aigües pluvials. Barcelona, Facultat de Belles Arts - Universitat Barcelona

Slangen, A. B. A., C. A. Katsman, R. S. W. Wal, et al. (2012). "Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios." Climate Dynamics **38**(5-6): 1191-1209.

Syvitski, J. P. M., A. J. Kettner, I. Overeem, et al. (2009). "Sinking deltas due to human activities." Nature Geoscience **2**(10): 681-686.

Taborda, R., C. Andrade, F. Marques, et al. (2010). Plano Estratégico de Cascais face às Alterações Climáticas - Sector Zonas Costeiras, PECAC, Cascais: 48 pp.

Tamisiea, M. E. e J. X. Mitrovica (2011). "The moving boundaries of sea level change: Understanding the origins of geographic variability." Oceanography **2**(24): 24-39.

Tans, P., R. Keeling e NOAA/ESRL (2013, 5 de Janeiro de 2013). "Trends in Atmospheric Carbon Dioxide." Retrieved 21 de Fevereiro, 2013, from www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/.

Team Urban Water Management Deltares (2009). Land & Water Management in the Urban Environment. Delft, The Netherlands, Deltares: 69 pp.

UNFCCC (2011). Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010, Addendum, Part Two: Action taken by the Conference of the Parties at its sixteenth session. Framework Convention on Climate Change Mexico: 31pp.

USGS (2013, 08 de Março de 2013). "USGS Groundwater Information." Retrieved Abril 2013, 2013, from <http://water.usgs.gov/ogw/subsidence.html>.

Velicogna, I. (2009). "Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE." Geophys. Res. Lett. **36**(19): L19503.

Ven, F. v. d., E. v. Nieuwkerk, K. Stone, et al. (2011). Building the Netherlands Climate Proof: Urban Areas.

Vermeer, M. e S. Rahmstorf (2009). "Global sea level linked to global temperature." PNAS **106**: 21527–21532.

Westra, S., L. V. Alexander e F. W. Zwiers (2012). "Global increasing trends in annual maximum daily precipitation." Journal of Climate.

World Bank (2012). Turn Down the Heat: Why a 4°C Warmer World Must Be Avoided. Washington, DC, World Bank.

Anexos

Anexo 1

	Subida global do nível médio do mar (m) para 2050 e 2100					
	Estimativa para 2050	Estimativa mais baixa	Melhor Estimativa	Estimativa mais alta	Piores cenários	
Autor da projecção					Limite inferior	Limite superior
IPCC AR4 (2007)*	0.09-0.24	0.18	0.29 – 0.45	0.63	-	-
IPCC AR4 + descarga acelerada de gelo (2007)*	0.09-0.27	0.18	0.34 – 0.54	0.81		
UK Climate Projections (DEFRA e UK Climate Projections 2012)*	0.09-0.24	0.18	0.29 – 0.45	0.63	0.81	2.50
Dutch Delta Committee (Katsman et al. 2011)	-	0.55	-	1.15	-	1.70-2.40
National Research Council (NRC 2012)	0.18-0.42	0.50	0.85	1.40	-	-
United States National Climate Assessment (Parris et al. 2012)		0.50	-	1.20	-	2.00

* valores corrigidos para 2100 (CSIRO 2011).

TABELA 1. Resumo das projecções para 2050 e 2100 dos relatórios de especialistas para a SNMM, relativamente a 2000. Os valores a cinza escuro correspondem aos cenários recomendados e adoptados pelos investigadores e instituições.

Anexo 2

A SNMM constitui um sinal global que é distribuído regionalmente de forma diferenciada. No caso de Portugal, a sua distribuição durante o século XX é muito semelhante à média global. As medições do marégrafo de Cascais, que constitui um dos observatórios do nível do mar mais antigos e fiáveis da rede global de marégrafos, registaram entre 1920 e 2000 uma subida linear de 1.7 mm/ano, sendo compatível com o valor global de 1.6-1.8 mm/ano (Figura 58) (Antunes 2009; Meyssignac et al. 2012). Os valores registados subiram a partir dos anos 90, tal como no resto do mundo, estimando-se uma subida total de 16 cm entre 1935 e 2009 (Antunes 2011a).

A ausência de diferenças entre a média global e o nível do mar registado em Cascais permitem sugerir uma adopção directa das projecções globais para a SNMM, reforçada ainda por movimentos verticais praticamente negligenciáveis (Figura 59) (Antunes 2010; Taborda, Andrade et al. 2010). Mas enquanto a SNMM passada é maioritariamente atribuível à expansão térmica, a futura será em grande parte devido ao derretimento das massas de gelo polares, que possuem uma distribuição de massa muito diferente (Tamisiea e Mitrovica 2011).

De modo a corrigir as diferenças para Lisboa, utilizaram-se os padrões de regionalização de Slangen, Katsman et al. (2012) e Perrette, Landerer et al. (2012), que apontam para menos 10 cm que a média global para as projecções entre 0.50 e 1.40 m para o final do século, podendo as diferenças ser maiores para subidas superiores.

Os valores regionalizados para Lisboa devem ter em consideração a influência da circulação oceânica, cujas variações estão associadas ao índice NAO e ao estabelecimento de baixas pressões na região dos Açores. Nos períodos negativos de NAO regista-se um aumento do nível do mar, acontecendo o inverso nos períodos positivos. Em 2010 observou-se um aumento do nível do mar associado a um período negativo de NAO de cerca de 7 cm em Cascais, elevando para 23 cm a subida total do nível do mar desde 1935, e 10 cm no mar Mediterrânico (Antunes 2011b; Landerer 2013). Este tipo de oscilações deve ser tido em conta nas projecções, sendo a sua importância reforçada pela coincidência com períodos mais tempestuosos e de maiores sobreelevações.

Na tabela 2 apresentam-se os valores regionalizados para Lisboa de acordo com as projecções globais adoptadas, e que serão utilizados para estimar os impactos em Lisboa. Na tabela 3 apresentam-se os intervalos de variação dos diversos factores que influenciam o nível do mar no estuário.

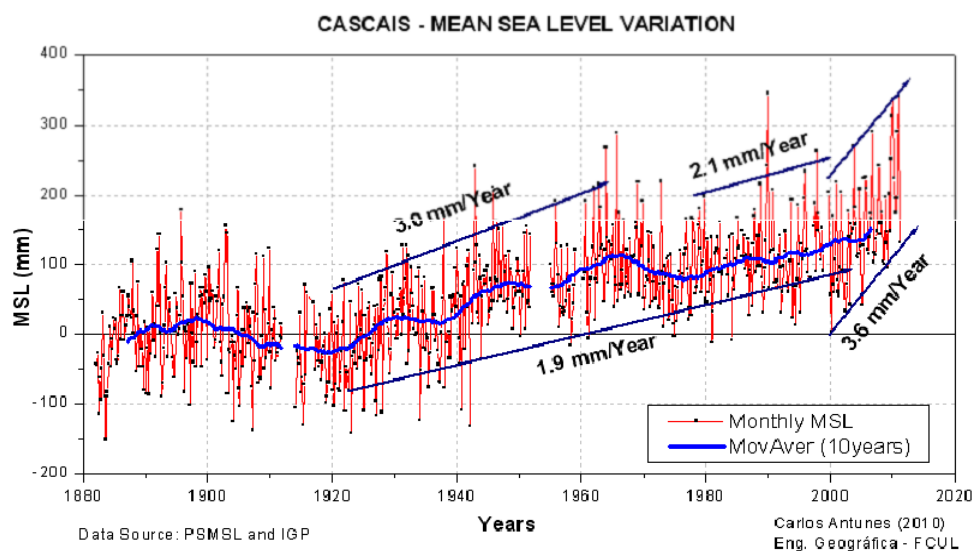


FIGURA 58. Variações da subida do nível do mar no marégrafo de Cascais entre 1880 e 2009 (In: Antunes (2012b).

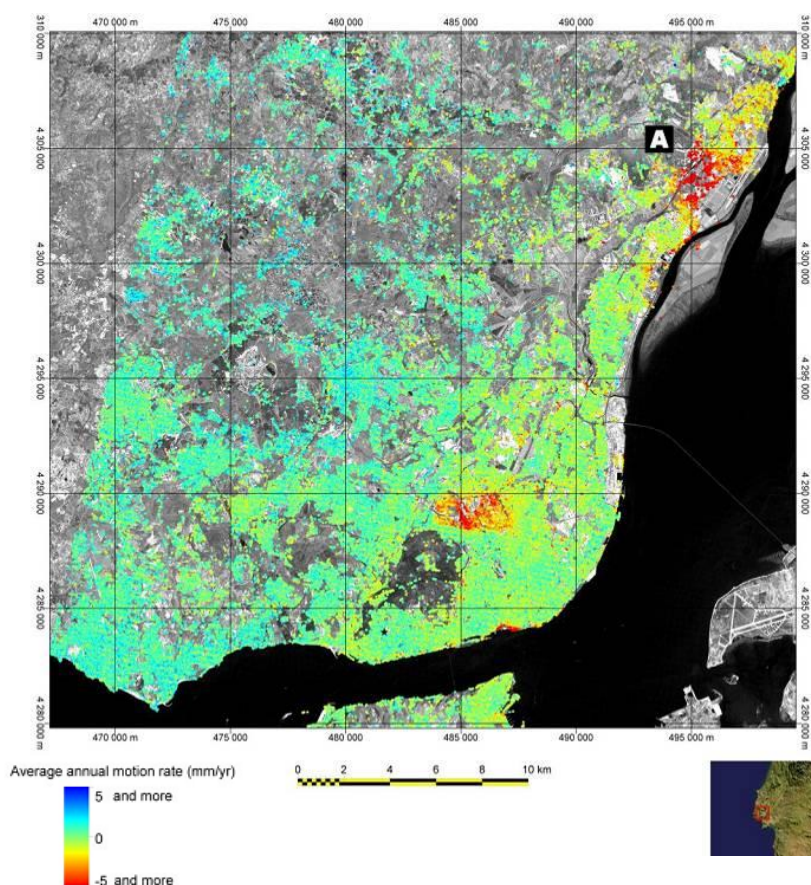


FIGURA 59. Movimentos verticais de Lisboa durante 1992 e 2003. A ausência de fortes movimentos verticais na cidade é apenas contrariada pela subsidência localizada na Póvoa de Santa Iria-Alverca, Alta de Lisboa-Lumiar e em Santos-Cais do Sodré. Fonte: (Catalão 2012).

Global and Lisbon Regional Sea Level Rise in Meters (m) for 2100						
Autor da projecção		Estimativa mais baixa	Melhor Estimativa	Estimativa mais alta	Piores cenários	
					Limite inferior	Limite superior
UK Climate Projections (DEFRA et al. 2012)*	Global	0.18	0.29 - 0.44	0.63	0.81	2.50
	Regional	-	0.19 - 0.34	0.53	0.71	>1.90 - <2.50
Dutch Delta Committee (Katsman et al. 2011)	Global	0.55	-	1.15	-	1.70 -2.40
	Regional	0.45	-	1.05	-	>1.40 - <2.40
National Research Council (NRC 2012)	Global	0.50	0.85	1.40	-	-
	Regional	0.40	0.75	1.30	-	-
United States National Climate Assessment (Parris et al. 2012)	Global	0.50	-	1.20	-	2.00
	Regional	0.40	-	1.10	-	<2.00

* valores corrigidos para 2100 por CSIRO (2011).

TABELA 2. Projecções globais e regionalizadas para Lisboa, assumindo um desvio negativo de 10 cm para as estimativas entre 0.50-1.40 m.

	2013	2050	2100	Factores de influência para Lisboa
Projecção da subida regionalizada do nível do mar (para 2100)	-	0.18 – 0.42	0.40 - 1.30	Regionalização da subida do nível médio do mar
Sobreelevação meteorológica (PECAC 2010)	0.00 - 0.43	0.00 - 0.43	0.00 - 0.43	Baixa pressão atmosférica
Maré astronómica no Terreiro do Paço (APL 2012)	0.00 - 4.50	0.00 - 4.50	0.00 - 4.50	Atracção gravítica do Sol e Lua
Circulação oceânica (Antunes 2011a)	0.07	0.00 - 0.10	0.00 - 0.10	Índice NAO
Cheia progressiva do Tejo (Daveau (1995), in Ramos (2001))	0.00 - 0.50	0.00 - 0.50	0.00 - 0.50	Barragens e precipitação (dias a semanas)
Ondulação no estuário	0.00 - 0.70	0.00 - 0.70	0.00 - 0.70	Vento Sul
Subida do nível do mar já registada em 2009 – Correção cartográfica (Antunes 2011a)	0.16	0.16	0.16	-
Zero Hidrográfico Local (FCUL)	2.20	2.20	2.20	-

TABELA 3. Variações do nível da água no estuário do Tejo em metros e factores de influência.